

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**MODULÁRNÍ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK
DVOUPÁSMOVÝCH REPRODUKTOROVÝCH SOUSTAV**

MODULAR SYSTEM FOR MEASURING THE CHARACTERISTICS OF TWO-WAY LOUDSPEAKER
SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marko Pešek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Marko Pešek

ID: 172037

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Modulární systém pro měření charakteristik dvoupásmových reproduktorových soustav

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte postup návrhu ozvučnice pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu, zaměřte se především na problematiku geometrie ozvučnice a umístění reproduktorů, které ovlivňují výsledné charakteristiky reproduktorové soustavy. Výstupem práce budou přípravy pro měření parametrů a charakteristik samostatných reproduktorů a dvoupásmových reproduktorových soustav. První modulární systém bude umožňovat měření charakteristik vysokotónového reproduktoru na různých typech ozvučnic s různou topologií a tvarem, které se od sebe liší mírou difrakce. Druhé modulární řešení bude ve formě dvoupásmové reproduktorové soustavy pokrývající jednoduché řešení ve formě kvádrů, přes řešení potlačující difrakce až po řešení s téměř eliminovanými difrakcemi. Modulární řešení bude také umožňovat změnu topologie vysokotónového a hlubokotónového reproduktoru vůči sobě. Dalším výstupem budou tři laboratorní úlohy využívající navržené a vyrobené modulární systémy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] TOMAN, K. Reprodukory a reprosoustavy II. [Česko: s.n.], 2010. ISBN 978-80-254-9510-0.

[2] CALDWELL, J. Analog, Active Crossover Circuit for Two-Way Loudspeakers 1st ed. Texas Instruments, 2013, [online] <http://www.ti.com/lit/ug/tidu035/tidu035.pdf>

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací modulárního systému pro měření charakteristik dvoupásmových reproduktorových soustav, zaměřeného především na problematiku geometrie ozvučnice a umístění reproduktorů. Dále byly naměřeny charakteristiky jednotlivých modulů a zpracovány laboratorní úlohy s využitím těchto modulů.

KLÍČOVÁ SLOVA

modulární systém, modul, ozvučnice, reproduktor, difrakce zvukového vlnění, vzájemná poloha reproduktorů, stojaté vlnění, kmitočtová charakteristika, směrová charakteristika, laboratorní úlohy

ABSTRACT

This master's thesis deals with design and implementation of modular system for two-way loudspeaker system's characteristics. Work focus mainly on the enclosure geometry and speaker placement. The individual modules of the system were designed and then implemented. Furthermore, the characteristics of these modules were measured and laboratory tasks using these modules were elaborated.

KEYWORDS

modular system, module, enclosure, speaker, diffraction of sound waves, the relative position of the speakers, standing waves, frequency response, directional characteristic, laboratory tasks

PEŠEK, Marko. *Modulární systém pro měření charakteristik dvoupásmových reproduktorových soustav*. Brno, Rok, 129 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Modulární systém pro měření charakteristik dvoupásmových reproduktorových soustav“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Miroslavu Balíkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost, odbornou pomoc a podnětné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu během celé délky mého studia.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	15
1 Teorie návrhu reproduktorových ozvučnic	16
1.1 Typy ozvučnic	16
1.1.1 Rovinná deska	16
1.1.2 Otevřená ozvučnice	17
1.1.3 Uzavřená ozvučnice	18
1.1.4 Ozvučnice typu bassreflex	19
1.2 Vnitřní tlumení stojatých vln	21
1.3 Baffle step	22
2 Difrakce zvukového vlnění na ozvučnici	23
2.1 Kulová ozvučnice	24
2.2 Polokulová ozvučnice	25
2.3 Válcová ozvučnice	26
2.4 Kuželová ozvučnice	28
2.5 Jehlanová ozvučnice	29
2.6 Krychlová ozvučnice	31
2.7 Krychlová ozvučnice se zkosenými hranami	32
2.8 Kvádrová ozvučnice	33
2.9 Kvádrová ozvučnice se zkosenými hranami	34
3 Vzájemná poloha reproduktorů v dvoupásmové ozvučnici	36
3.1 Vzdálenost akustických os	37
3.2 Vzdálenost vzájemného zapuštění	38
3.2.1 Reproductory v rovině s ozvučnicí	39
3.2.2 Reproductory v nakloněné ozvučnici	39
3.2.3 Vyrovnání vyzařovacích bodů	41
4 Měření vlastností reproduktorů a reproduktorových soustav	42
4.1 Frekvenční charakteristika	42
4.2 Směrová charakteristika	43
5 Postup při návrhu a realizaci ozvučnic dvoupásmových soustav	44

6	Návrh modulů pro měření difrakcí na ozvučnici	47
6.1	Pouzdro výškového reproduktoru	47
6.2	Úchyt ozvučnic pro měření	47
6.3	Moduly pro měření vlivu difrakcí na ozvučnici	48
6.3.1	Kruhová ozvučnice	49
6.3.2	Obdélníková ozvučnice s reproduktorem ve středu	50
6.3.3	Obdélníková ozvučnice s reproduktorem mimo střed	51
6.3.4	Symetrická obdélníková ozvučnice s přesahy	51
6.3.5	Nesymetrická obdélníková ozvučnice s přesahy	53
6.3.6	Ozvučnice typu kapky	54
7	Návrh dvoupásmových ozvučnic	56
7.1	Měření reálných vlastností reproduktorů	57
7.1.1	Měření impedančních charakteristik	57
7.1.2	Výpočet Thiele-Smallových parametrů	58
7.2	Návrh typu a objemu ozvučnice	59
7.3	Návrh základní ozvučnice	59
7.4	Návrh ozvučnice se zkosenými hranami	61
7.5	Návrh ozvučnice s variabilní polohou výškového reproduktoru	62
8	Realizace modulů	64
8.1	Moduly výškového reproduktoru	65
8.1.1	Kruhová ozvučnice	65
8.1.2	Obdélníková ozvučnice s reproduktorem ve středu	65
8.1.3	Symetrická obdélníková ozvučnice	67
8.1.4	Symetrická obdélníková ozvučnice s bočnicemi	67
8.1.5	Nesymetrická obdélníková ozvučnice s bočnicemi	69
8.1.6	Ozvučnice typu kapky	69
8.2	Dvoupásmové ozvučnice	71
8.2.1	Základní dvoupásmová ozvučnice	71
8.2.2	Dvoupásmová ozvučnice se zaoblenými hranami	76
8.2.3	Parametry pro návrh kmitočtových výhybek	79
9	Tvorba laboratorních úloh	81
9.1	Požadavky na laboratorní úlohy	81
9.2	Návody k úlohám	82
10	Závěr	83

Literatura	85
Seznam symbolů, veličin a zkratek	86
Seznam příloh	87
A Obsah přiloženého CD	89
B Modulární systém	90
B.1 Výměnný modul výškového reproduktoru	90
B.2 Speakon kabel	90
B.3 Kruhová ozvučnice	91
B.4 Ozvučnice s otvorem v geometrickém středu	91
B.5 Symetrická ozvučnice	92
B.6 Symetrická ozvučnice s boky	92
B.7 Nesymetrická ozvučnice s boky	93
B.8 Základní dvoupásmová ozvučnice	93
B.9 Dvoupásmová ozvučnice se zkosenými hranami	94
C Naměřené grafy	95
C.1 Impedanční charakteristika reproduktoru SPH-170 č.1	95
C.2 Fázová charakteristika reproduktoru SPH-170 č.1	95
C.3 Impedanční charakteristika reproduktorů SPH-170	96
C.4 Fázová charakteristika reproduktorů SPH-170	96
C.5 Kmitočtové charakteristika kruhové ozvučnice – úhly	97
C.6 Kmitočtové charakteristika ozvučnice s otvorem v geometrickém středu – úhly	97
C.7 Kmitočtové charakteristika symetrické ozvučnice – úhly	98
C.8 Kmitočtové charakteristika symetrické ozvučnice s boky – úhly	98
C.9 Kmitočtové charakteristika nesymetrické ozvučnice s boky – úhly	99
C.10 Směrové charakteristika symetrické ozvučnice s boky – úhly	99
C.11 Směrové charakteristika nesymetrické ozvučnice s boky – úhly	100
C.12 Kmitočtové charakteristika výškového reproduktoru v základní dvou- pásmové ozvučnici	100
C.13 Kmitočtové charakteristika výškového reproduktoru v ozvučnici se zkosenými hranami	101
C.14 Kmitočtové charakteristika středobasového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici	101
C.15 Kmitočtové charakteristika středobasového reproduktoru v ozvučnici se zkosenými hranami	102

D	Upravené moduly výšky	103
D.1	Upravený modul kapky	103
D.2	Upravený modul výškového reproduktoru	103

Seznam obrázků

1.1	Rovinná deska cit. [2]	17
1.2	Otevřená ozvučnice cit. [2]	18
1.3	Uzavřená ozvučnice a její mechanicko-analogický cit. [1]	18
1.4	Ozvučnice typu bassreflex a její mechanicko-analogický obvod cit. [1]	20
1.5	Změna akustického tlaku a výchylky membrány reproduktoru v uzavřené ozvučnici a ozvučnici typu bassreflex cit.[1]	21
2.1	Vznik difrakcí na hranách ozvučnice	23
2.2	Kulová ozvučnice	24
2.3	Frekvenční charakteristika kulové ozvučnice cit.[5]	25
2.4	Polokulová ozvučnice	25
2.5	Frekvenční charakteristika polokulové ozvučnice cit.[5]	26
2.6	Válcové ozvučnice: vlevo ozvučnice naležato a vpravo ozvučnice nastojato	26
2.7	Frekvenční charakteristika válcové ozvučnice naležato cit.[5]	27
2.8	Frekvenční charakteristika válcové ozvučnice nastojato cit.[5]	27
2.9	Kuželové ozvučnice: vlevo ozvučnice jednoduchého kuželu a vpravo ozvučnice oboustranného kuželu	28
2.10	Frekvenční charakteristika jednoduché kuželové ozvučnice cit.[5]	28
2.11	Frekvenční charakteristika oboustranné kuželové ozvučnice cit.[5]	29
2.12	Jehlanové ozvučnice: vlevo ozvučnice oboustranného jehlanu a vpravo ozvučnice jednoduchého jehlanu	29
2.13	Frekvenční charakteristika jednoduché jehlanové ozvučnice cit.[5]	30
2.14	Frekvenční charakteristika oboustranné jehlanové ozvučnice cit.[5]	30
2.15	Krychlová ozvučnice	31
2.16	Frekvenční charakteristika krychlové ozvučnice cit.[5]	31
2.17	Krychlová ozvučnice se zkosenými hranami	32
2.18	Frekvenční charakteristika krychlové ozvučnice se zkosenými hranami cit.[5]	33
2.19	Kvádrová ozvučnice	33
2.20	Frekvenční charakteristika kvádrové ozvučnice cit.[4]	34
2.21	Kvádrová ozvučnice se zkosenými hranami	34
2.22	Frekvenční charakteristika kvádrové ozvučnice se zkosenými hranami cit.[4]	35
3.1	Určení akustické osy reproduktorové soustavy	36
3.2	Vzdálenost reproduktorů	37
3.3	Vzájemná hloubka zapuštění	38
3.4	Reproduktory v rovině s přední stranou ozvučnice	39

3.5	Reproduktory v rovině s přední stranou ozvučnice	40
3.6	Reproduktory v nakloněné ozvučnici	40
3.7	Zapuštění výškového reproduktoru	41
4.1	Zapojení měřicího pracoviště	42
4.2	Směrová charakteristika pístově kmitající kruhové membrány cit. [1] .	43
6.1	Frekvenční charakteristika výškového reproduktoru Monacor DT-25N	47
6.2	Výměnný modul výškového reproduktoru Monacor DT-25N	48
6.3	Mezikus pro uchycení ozvučnic do stativu	48
6.4	Jeřábový stativ pro uchycení modulů	49
6.5	Kruhová ozvučnice	50
6.6	Obdélníková ozvučnice s reproduktorem ve středu	51
6.7	Obdélníková ozvučnice s reproduktorem mimo střed	52
6.8	Symetrická obdélníková ozvučnice s přesahy	53
6.9	Nesymetrická obdélníková ozvučnice s přesahy	54
6.10	Ozvučnice tvaru kapky	55
7.1	Frekvenční charakteristika středobasového reproduktoru Monacor SPH- 170	56
7.2	Základní dvoupásmová ozvučnice	60
7.3	Simulace ozvučnice o objemu 21 litrů	60
7.4	Ozvučnice se zkosenými hranami	61
7.5	Ozvučnice s variabilní polohou výškového reproduktoru	62
7.6	Simulace ozvučnice o objemu 46 litrů	63
8.1	Kmitočtová charakteristika modulu kruhové ozvučnice	66
8.2	Kmitočtová charakteristika modulu obdélníkové ozvučnice s repro- duktorem ve středu	66
8.3	Kmitočtová charakteristika modulu symetrické obdélníkové ozvučnice	67
8.4	Kmitočtová charakteristika modulu symetrické obdélníkové ozvučnice s bočnicemi	68
8.5	Kmitočtová charakteristika modulu nesymetrické obdélníkové ozvuč- nice s bočnicemi	68
8.6	Kmitočtová charakteristika modulu typu kapky se základním rádiusem	70
8.7	Kmitočtová charakteristika modulu typu kapky s upraveným rádiusem	70
8.8	Kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru v základní dvou- pásmové ozvučnici	72
8.9	Kmitočtové charakteristiky středobasového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici 1 m	73
8.10	Kmitočtové charakteristiky středobasového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici 25 cm	73

8.11	Směrová charakteristika výškového reproduktoru v základní dvou- pásmové ozvučnici – horizontální rovina	74
8.12	Směrová charakteristika výškového reproduktoru v základní dvou- pásmové ozvučnici – vertikální rovina	74
8.13	Směrová charakteristika středobasového reproduktoru v základní dvou- pásmové ozvučnici – horizontální rovina	75
8.14	Směrová charakteristika středobasového reproduktoru v základní dvou- pásmové ozvučnici – vertikální rovina	75
8.15	Kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami	76
8.16	Kmitočtové charakteristiky středobasového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami	77
8.17	Směrová charakteristika výškového reproduktoru v dvoupásmové ozvuč- nici se zaoblenými hranami – horizontální rovina	77
8.18	Směrová charakteristika výškového reproduktoru v dvoupásmové ozvuč- nici se zaoblenými hranami – vertikální rovina	78
8.19	Směrová charakteristika středobasového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami – horizontální rovina	78
8.20	Směrová charakteristika středobasového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami – vertikální rovina	79
8.21	Pasivní korekce baffle stepu	80
8.22	Simulace korekce baffle stepu	80

Seznam tabulek

7.1	Vzdálenosti mezi reproduktory	57
7.2	Thiele-Smallovy parametry použitých reproduktorů Monacor SPH-170	59
8.1	Soupis potřebného materiálu	64
8.2	Zapojení konektoru speakon v dvoupásmové ozvučnici	71

Úvod

Cílem diplomové práce je nastudování postupu návrhu ozvučnice pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu zaměřeného především na problematiku geometrie ozvučnice a umístění reproduktorů, které ovlivňují výsledné charakteristiky reproduktorové soustavy. Dále návrhem a realizací modulárních systémů pro měření charakteristik dvoupásmových reproduktorových soustav. Dalším výstupem budou tři laboratorní úlohy využívající navržené a vyrobené modulární systémy.

V první části se zabývám všeobecnou teorií návrhu dvoupásmových reproduktorových soustav zaměřenou zejména na vznik difrakcí na hranách ozvučnice, vzájemnou polohou reproduktorů umístěných v ozvučnici a jejich vlivem na výslednou kmitočtovou charakteristiku.

V druhé části se zabývám návrhem přípravků určených pro měření difrakcí na ozvučnici za použití jednoho reproduktoru, měření difrakcí na dvoupásmové ozvučnici a jejich následné eliminaci a měřením vlivu vzájemné polohy reproduktorů v dvoupásmové ozvučnici na výslednou kmitočtovou charakteristiku.

V další části práce je popsán postup při jejich realizaci a zjištění jejich skutečných vlastností za pomoci měření kmitočtových a směrových charakteristik.

V poslední kapitole práce jsou dle zjištěných vlastností jednotlivých přípravků vypracované požadavky na laboratorní úlohy.

1 Teorie návrhu reproduktorových ozvučnic

V této kapitole čerpám teoretické poznatky z literatury [1] [2].

Reproduktorovou ozvučnici využíváme především proto, že pro lepší funkci reproduktorů je zapotřebí oddělit jejich zadní a přední zvukové vlny, které reproduktory svým kmitáním vytváří, z důvodu jejich vzájemného vlivu a vzniku akustického zkratu.

Dalším důvodem umístění reproduktorů do ozvučnice je to, že v současné době nelze pořídit reproduktor, který by v celém slyšitelném pásmu (20 – 20000 Hz) měl vyrovnanou a lineární kmitočtovou charakteristiku. Díky osazení ozvučnice standardně dvěma nebo třemi reproduktory, z nichž každý je učen pro reprodukci jiného kmitočtového pásma, dosáhneme vyrovnané kmitočtové charakteristiky v celém slyšitelném pásmu.

1.1 Typy ozvučnic

Vzhledem ke konstrukčním možnostem máme čtyři základní typy ozvučnic, které je možno při návrhu brát v potaz. Jedná se ozvučnice typu rovinná deska, otevřená ozvučnice, uzavřená ozvučnice a ozvučnice typu bassreflex.

Reproduktory se vsazují do ozvučnice proto, aby došlo zamezení vzniku akustického zkratu z důvodu interferencí přední a zadní vlny reproduktoru. Tento zkrat vzniká zejména na nízkých kmitočtech a proto je návrh reproduktorové ozvučnice prováděn dle parametrů reproduktorů určeného pro jejich reprodukci.

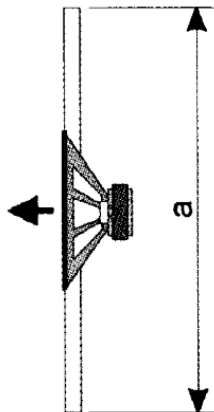
Osazením reproduktoru do ozvučnice dojde ke změně průběhu frekvenční charakteristiky a také ke změně impedanční charakteristiky reproduktoru. U impedanční charakteristiky dojde ke zmenšení maximální výchylky pod určitým kmitočtem a tím se podaří vyrovnání kmitočtové charakteristiky v oblasti nižších kmitočtů.

1.1.1 Rovinná deska

Rovinná deska je základním typem ozvučnice, která by v ideálním případě měla nabývat nekonečných rozměrů. V praxi toto ovšem není možné a proto uvažujeme, že deska má konečné rozměry. Díky konečným rozměrům bude ozvučnice efektivně fungovat jen na kmitočtech, jejichž vlnová délka bude menší než vzdálenost středu reproduktoru od hran ozvučnice. Pro čtvercovou rovinnou desku o rozměrech $a \times a$ platí [1]

$$f_0 = \frac{c_0}{2a}, \quad (1.1)$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku a f_0 je rezonanční kmitočet deskové ozvučnice. Největší výhodou rovinné desky je její konstrukční jednoduchost a nevznikají zde ani stojatá vlnění. Velkou nevýhodou je, že díky konečným rozměrům nedojde k úplnému zamezení akustického zkratu na nízkých kmitočtech.



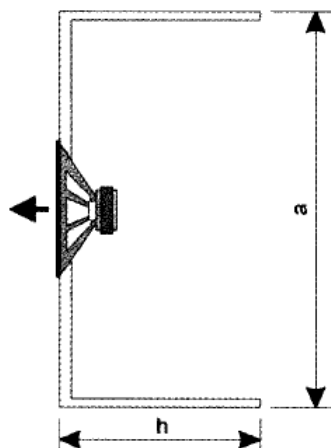
Obr. 1.1: Rovinná deska cit. [2]

1.1.2 Otevřená ozvučnice

Otevřená ozvučnice se hojně používala u starých elektronkových televizorů a radiových přijímačů. V dnešní době její použití najdeme hlavně u kytarových komb, kde bývá zadní část částečně nebo úplně otevřená. Díky otevřené zadní straně zde ale stále dochází ke vzniku akustického zkratu, jehož míra není ovlivněna jen rozměrem přední desky ozvučnice, ale také hloubkou bočnic. Čím je hloubka ozvučnice větší, tím se mezní kmitočet zmenšuje a činitel jakosti se zvětšuje. Mezní kmitočet f_0 je pro otevřenou ozvučnici určen dle vzorce [1]

$$f_o = \frac{55}{h\sqrt{1 + \frac{a}{2h}}}, \quad (1.2)$$

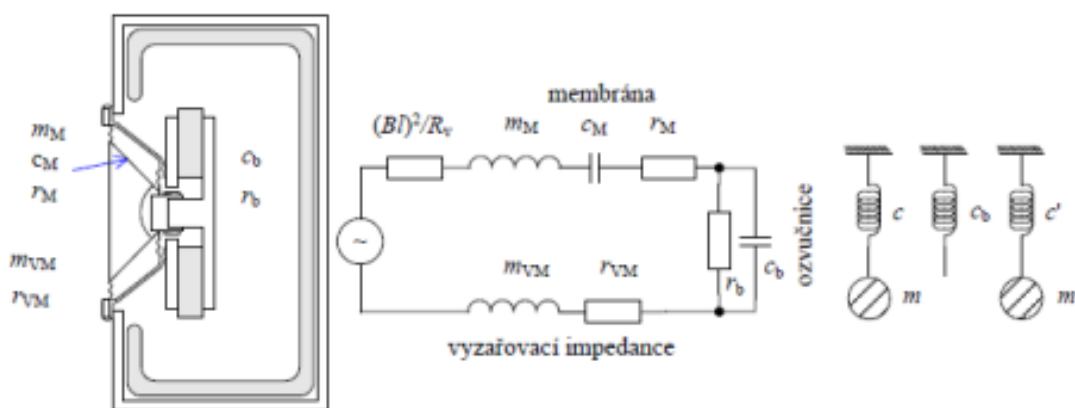
kde a je šířka a h hloubka ozvučnice.



Obr. 1.2: Otevřená ozvučnice cit. [2]

1.1.3 Uzavřená ozvučnice

Nejideálnější ozvučnice pro reproduktor je rovinná deska s nekonečnými rozměry, kterou ale nelze zrealizovat. Rovinné desce s nekonečnými rozměry se vlastnostmi nejvíce přibližuje uzavřená ozvučnice. Její konstrukce je provedena tak, aby byla hermeticky uzavřena a měla tak pevně daný vnitřní objem.



Obr. 1.3: Uzavřená ozvučnice a její mechanicko-analogický cit. [1]

Na obr. 1.3 je k vidění změna chování reproduktoru v uzavřené ozvučnici převedené na mechanicko-analogický obvod. Z tohoto obvodu lze odvodit vliv ozvučnice na reproduktor a jeho funkčnost. Samostatný reproduktor reprezentuje pružina o poddajnosti c se zavěšeným závažím o hmotnosti m . Díky uzavření ozvučnice vznikne pevný vnitřní objem, který je značen V_b a ten se též chová jako pružina o poddajnosti c_b . Kombinací těchto dvou pružin vznikne pružina c' se zavěšeným závažím

o hmotnosti m . Z této analogie je jasné, že umístěním reproduktoru do uzavřené ozvučnice dojde ke zvýšení jeho rezonančního kmitočtu f_r , pro který platí [1]

$$\frac{f_c}{f_r} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} = \sqrt{\frac{c_M}{c_b} + 1}, \quad (1.3)$$

kde f_r je rezonanční frekvence reproduktoru, V_{as} je ekvivalentní objem reproduktoru, V_b je objem ozvučnice, c_M je poddajnost uložení kmitajícího systému reproduktoru a c_b poddajnost objemu ozvučnice.

Se zvyšujícím se rezonančním kmitočtem se zvyšuje i celkový činitel jakosti obvodu Q_s podle rovnice [1]

$$\frac{Q_c}{Q_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} = \sqrt{\frac{c_M}{c_b} + 1}. \quad (1.4)$$

Z rovnice vyplývá, že umístěním reproduktoru do uzavřené ozvučnice dojde ke zvyšování amplitudy u vyzařovaných akustických signálů a zvýšení strmosti impedance charakteristiky v blízkosti rezonančního kmitočtu.

Umístěním reproduktoru do uzavřené ozvučnice ovlivníme též charakteristickou citlivost reproduktoru. Charakteristická citlivost se udává pro reproduktory, které mají dokonale rozdělenou zadní a přední vlnu. Tím, že umístíme reproduktor do uzavřené ozvučnice, dojde k utlumení zadní vlny a snížení citlivosti na nízkých kmitočtech až o 6 dB.

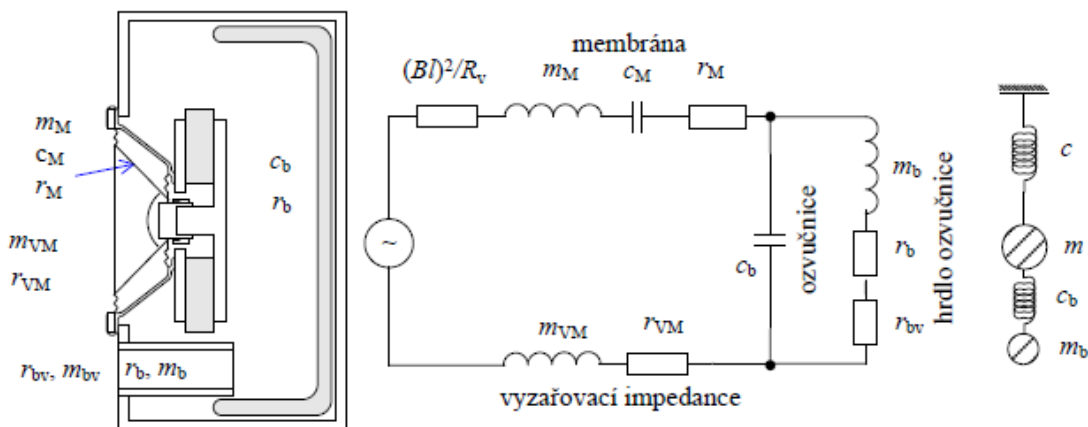
1.1.4 Ozvučnice typu bassreflex

Umístěním bassreflexového nátrubku nebo otvoru do uzavřené ozvučnice (kap. 1.1.1) nám vznikne ozvučnice typu bassreflex. Akustický tlak vyzařovaný otvorem je ve fázi s akustickým tlakem vyzařovaným reproduktorem a podporuje jej. Hodnota rezonančního kmitočtu rezonátoru se volí stejná jako je rezonanční kmitočet reproduktoru. Tím je dosaženo, že převážně větší množství akustické energie je vyzářeno plochou otvoru nátrubku. Díky tomu dosáhneme při malých výchylkách reproduktoru malého nelineárního zkreslení.

Pro určení, zda je daný reproduktor vhodný pro použití v bassreflexové ozvučnici, udává činitel EBP , pro který platí [2]

$$EBP = \frac{f_r}{Q_{es}}, \quad (1.5)$$

kde f_r je rezonanční kmitočet a Q_{es} je elektrický činitel jakosti reproduktoru. Pokud je činitel $EBP < 50$, pak je lepší reproduktor umístit spíše do uzavřené ozvučnice. Tento činitel je ale spíše informativní a řídit se jím nemusíme.



Obr. 1.4: Ozvučnice typu bassreflex a její mechanicko-analogický obvod cit. [1]

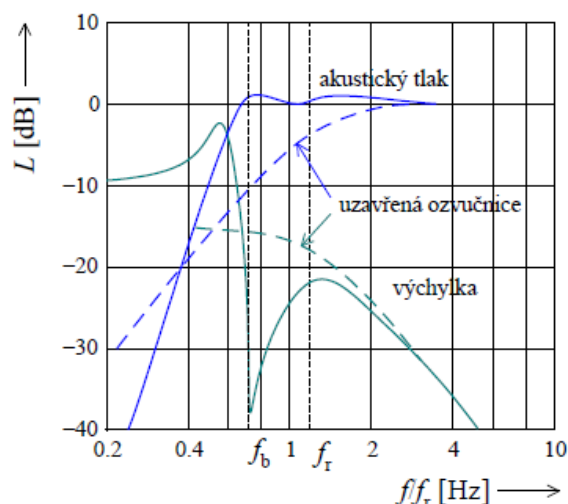
Na obr.1.4 je k vidění změna chování reproduktoru v bassreflexové ozvučnici převedené na mechanicko-analogický obvod. Oproti mechanicko-analogickému obvodu uzavřené ozvučnice OBR je zde přidána ještě jedna pružina se závažím, která reprezentuje chování bassreflexového nátrubku. Výsledná pružina představuje z hlediska elektromechanické analogie dva rezonanční obvody, které se navzájem ovlivňují.

V bassreflexové ozvučnici dosáhneme nového rezonančního kmitočtu f_r , pro který platí $f_b < f_c$. Při objemu ozvučnice V_b , průřezu nátrubku S a jeho délce l , pak rezonanční kmitočet odpovídá [2]

$$f_b = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_b(l + 0,96\sqrt{S})}}. \quad (1.6)$$

Umístěním reproduktoru do bassreflexové ozvučnice dosáhneme oproti uzavřené ozvučnici lepší reprodukce nižších kmitočtů. Nevýhodou této ozvučnice je zkreslení, které je zapříčiněno větší výchylkou membrány reproduktoru a větší rychlostí proudění vzduchu v nátrubku. Pokud vzduch proudí nátrubkem rychleji než 3 ms^{-1} , mohou vzniknout na hranách nátrubku parazitní zvuky, které ovlivní kvalitu reprodukováného signálu.

Při umístění bassreflexové ozvučnice do prostoru je potřeba dodržet jistá pravidla. Nejdůležitějším z nich je, že před otvorem bassreflexového nátrubku nesmí být ve vzdálenosti minimálně 20 cm žádná překážka. Pokud by zde byla umístěna nějaká překážka, zabránila by správné funkci nátrubku a celkové funkci celé soustavy.



Obr. 1.5: Změna akustického tlaku a výchylky membrány reproduktoru v uzavřené ozvučnici a ozvučnici typu bassreflex cit.[1]

1.2 Vnitřní tlumení stojatých vln

Použitím ozvučnice sice dosáhneme buď částečného nebo úplného oddělení předních a zadních akustických vlnění produkovaných reproduktory a zabránění jejich interferencí, ale je také potřeba brát v potaz, co se děje vně ozvučnice. Uvnitř ozvučnice se vytvoří vzduchový sloupec, nímž se šíří zvuková vlna, která se odráží od stěn a putuje zpět k reproduktoru. Díky tomu vzniká v ozvučnici stojaté vlnění, jehož vlnová délka odpovídá $1/n$ násobkem vnitřních rozměrů ozvučnice. Stojaté vlnění se ovlivní výslednou kmitočtovou charakteristikou zvlněním na kmitočtech, pro které platí

$$f = 2^n \frac{c_0}{l}. \quad (1.7)$$

kde c_0 je rychlost zvuku, l je vnitřní rozměr reproduktorové skříně a $n = 1, 2, 3$ atd. Nejsilnější mód stojatého vlnění vznikne přesně uprostřed ozvučnice a jeho vlnová délka odpovídá dvojnásobku největšího vnitřního rozměru ozvučnice, avšak i zbylé rozměry skříně ovlivňují vznik stojatého vlnění. Další módy a jejich maxima a minima se nachází jinde, což značně znesnadňuje umístění tlumicího materiálu.

Pro zamezení vzniku stojatého vlnění lze použít tlumicí materiál nebo při návrhu ozvučnice zvolit vhodnou konstrukci. Vznik stojatého vlnění je způsoben zejména rovnoběžným řešením stěn ozvučnice, a tudíž lze jej omezit konstrukcí ozvučnice bez rovnoběžných stěn. Pro potlačení stojatého vlnění za použití vnitřního tlumení používáme tyto metody:

1. **Tlumení na stěny** – jedná se o nejčastější použitý druh vnitřního tlumení, kdy se používá zhruba 6cm vrstva tlumicího materiálu. Se zvětšujícím se rozměrem vrstvy je tlumení účinnější pro nižší kmitočty, ale to neznamená, že čím větší vrstva, tím lepší výsledek. Orientačně se používá 1/10 výšky sloupové skříně. Jako tlumicí materiál se používají speciální tlumicí rouna s vysokou pohltivostí a popřípadě molitan, jehož tlumicí účinky jsou spíše jen průměrné.
2. **Tlumení na výztuhu** – pokud jsou v ozvučnici použity vnitřní výztuhy a jsou umístěny ve středu jejího největšího rozměru, tak je vhodné tuto výztuhu obalit silnou vrstvou tlumicího materiálu. Tím vlastně utlumíme místo, kde vzniká první a nejsilnější mód stojatého vlnění.
3. **Metoda zigzag** – tato metoda je jedna z nejúčinnějších, kdy tlumicí materiál je veden skříní zleva doprava a zpět po celém vnitřním objemu ozvučnice. Je vhodné použít řidší materiál, díky čemuž můžeme vytvořit více vrstev. Uprostřed, kde vzniká nejsilnější mód, je vhodné materiál co nejvíce zhustit. Při umísťování tlumicího materiálu je zapotřebí dávat pozor, abychom jej neumísťovali v těsné blízkosti kolem reproduktoru a bassreflexového nátrubku. Vnitřní tlumení má kromě pozitivních účinků i svá negativa, protože kromě tlumení stojatého vlnění též mění poddajnost vnitřního objemu ozvučnice a zvětšuje akustický odpor. Tyto vlastnosti mají vliv na výslednou kmitočtovou charakteristiku reproduktoru umístěného v ozvučnici zejména v okolí rezonančního a dolního mezního kmitočtu reproduktoru.

1.3 Baffle step

U reproduktorů umístěných do ozvučnice se vyzařovaný signál šíří přímým směrem ve formě pólů jen do určitého kmitočtu. Hodnota tohoto kmitočtu je dána rozměry přední desky ozvučnice. Pro kmitočty o vlnové délce větší, než je největší rozměr přední desky ozvučnice, se vyzařované vlnění již začíná šířit všesměrově a díky tomu reproduktor vyzařuje signál do dvojnásobného prostoru oproti vyšším kmitočtům. V případě, kdy se akustický signál ještě nešíří všesměrově, je množství vyzařovaného signálu rozprostřeno do polovičního prostoru a dojde tím tedy ke zvýšení intenzity zvuku. Tento jev se nám promítne do průběhu kmitočtové charakteristiky poklesem pro pásmo kmitočtů s vlnovou délkou větší, než je rozměr přední desky ozvučnice, a je jej potřeba kompenzovat obvodem na kmitočtové výhybce. [3]

2 Difrakce zvukového vlnění na ozvučnici

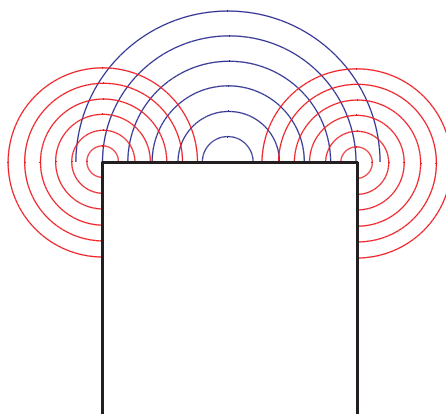
V této kapitole čerpám teoretické poznatky z literatury [4] [5].

Výslednou kmitočtovou charakteristiku reproduktorové soustavy nebo reproduktoru samotného ovlivňují zejména dva fyzikální děje difrakce a interference vlnění.

Difrakce zvukového vlnění, neboli ohyb vlnění všeobecně, dochází při dopadu vlnění na překážku konečných rozměrů. Přesněji na všech jejích ostrých hranách, které jsou vystaveny dopadu vlnění. Za hranou dochází k ohybu vlnění od svého původního směru a dostává se tak do oblasti geometrického stínu překážky. Když vlnění dopadá pouze na část překážky bez hran, dojde pouze k částečnému pohlcení vlnění a odrazu zpět do prostoru.

Druhým důležitým fyzikálním dějem, ke kterému dochází, je interference vlnění. Interference vlnění nastává, když se setkají v jednom bodě prostoru dvě a nebo více vln. Podle rozdílu fáze jednotlivých vln v určitém bodě prostoru dochází k součtu nebo rozdílu jejich amplitud, a tím dochází k zesílení nebo zeslabení amplitudy v daném bodě.

Na obr.2.1 je znázorněn vznik difrakcí na ozvučnici typu kostky. Elektroakustický měnič vyzařuje zvukové vlnění ve formě kulové vlny směrem od ozvučnice. Když vlna dojde na hrany ozvučnice dojde zde k difrakci vlnění. Tento jev si můžeme představit pro zjednodušení tak, že na hranách vzniká nová kulová vlna, která se šíří dále prostorem. Když se setkají tyto dvě vlny, vlna z měniče a vlna vzniklá na hraně, dojde k interferenci těchto vln a změně výsledné kmitočtové charakteristiky.



Obr. 2.1: Vznik difrakcí na hranách ozvučnice

Při návrhu ozvučnice je tedy zapotřebí zbavit se všech ostrých hran, na kterých by mohlo dojít k difrakci zvukového vlnění. Prvním krokem pro eliminaci difrakcí, je vyřešit tvar ozvučnice jako takové. Nejčastěji používaná ozvučnice tvaru kvádru nebo krychle je sice na konstrukci nejjednodušší, ale není nejlepší kvůli vzniku difrakcí na jejích ostrých hranách, a proto se volí jiné tvary, u kterých jsou hrany

eliminovány. V dalším kroku musíme brát v úvahu to, že stejná vzdálenost hran od reproduktoru zesiluje vliv vln vzniklých díky difracím na hraně. Pokud jsou všechny vzdálenosti stejné, tak i zpoždění vln vzniklých na hranách vůči primárním vlnám reproduktoru bude též stejné. Zvlnění kmitočtové charakteristiky bude nabývat větších rozměrů na kmitočtech odpovídajících vlnové délce, která je shodná se vzdáleností hran ozvučnice a reproduktoru. Z toho důvodu by měl být reproduktor umístěn nesymetricky vůči všem hranám, aby tento vliv byl potlačen. Nakonec je potřeba si uvědomit, že difrakce může vznikat i na hranách reproduktoru, proto je potřeba reproduktory zapustit tak, aby přechod reproduktor-ozvučnice byl bez hran a co nejplynulejší. Dalšími prvky, na kterých může vnikat difrakce, jsou šrouby, které jsou použity k uchycení reproduktorů do ozvučnice. Tyto šrouby by měly mít zápusťnou hlavu tak, aby nepřesahovala.

V následujících kapitolách se budeme zabývat základními tvary ozvučnic popsanými v cit. a jejich vlivem na výslednou kmitočtovou charakteristiku.

2.1 Kulová ozvučnice

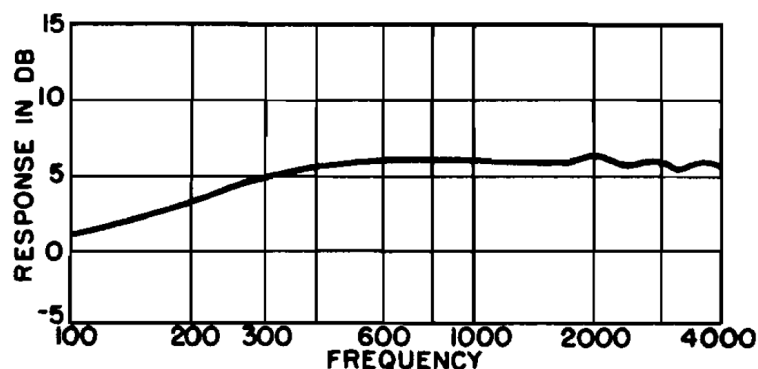
Nejideálnějším tvarem ozvučnice je kulová ozvučnice (obr.2.2). Na ozvučnici nejsou žádné hrany, na kterých by mohlo docházet k difrakci zvukového vlnění, a frekvenční charakteristika je co nejvyrovnanější v celém spektru. Záleží pouze na reálných vlastnostech použitého reproduktoru.



Obr. 2.2: Kulová ozvučnice

Rádus kulové ozvučnice by měl být ideálně srovnatelný s rádiusem zvukovodu reproduktoru, kterým chceme ozvučnici osadit, a to z toho důvodu, aby se vlnění šířilo po povrchu ozvučnice rovnoměrně a nedocházelo k deformaci vlnoplochy.

Na obr.2.3 je znázorněna frekvenční charakteristika kulové ozvučnice, na které je vidět vyrovnanost kmitočtové charakteristiky v celém spektru.



Obr. 2.3: Frekvenční charakteristika kulové ozvučnice cit.[5]

2.2 Polokulová ozvučnice

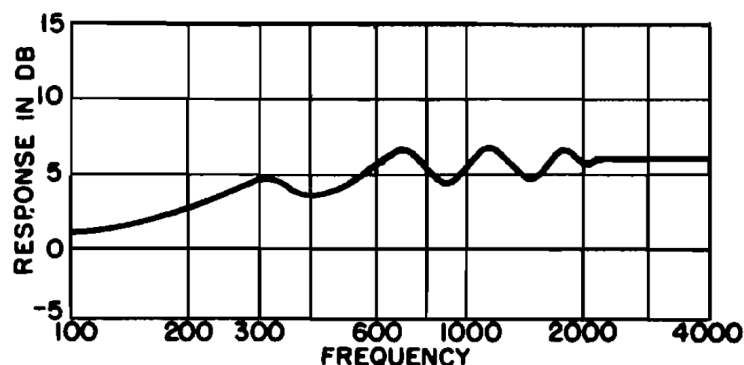
Tento tvar (obr. 2.4) vychází z kulové ozvučnice, která je rozpůlená na dva shodné díly, tudíž na zadní straně ozvučnice dostane rovnou plochu kruhového tvaru s poloměrem kulové ozvučnice. Platí zde též, že by velikost rádiusu přední strany měla být srovnatelná s rádiusem zvukovodu reproduktoru.



Obr. 2.4: Polokulová ozvučnice

Díky oříznutí koule dostaneme ostrou hranu, na které již vznikají difrakce ovlivňující výslednou kmitočtovou charakteristiku. Tyto difrakce nám ovlivní kmitočtovou charakteristiku na frekvencích se stejnou nebo větší vlnovou délkou, která odpovídá hloubce ozvučnice. Na obr.2.5 je znázorněna frekvenční charakteristika poloku-

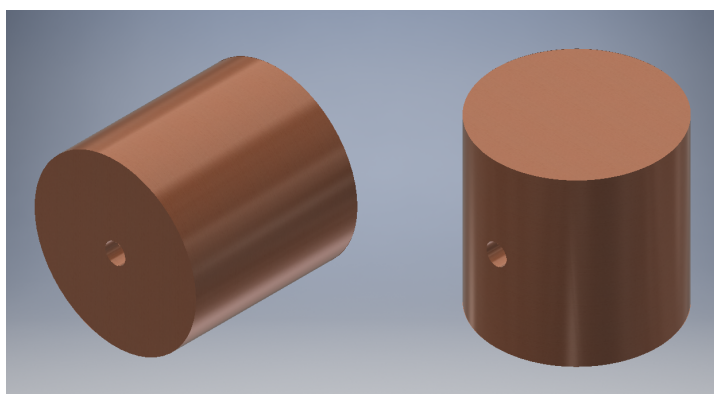
lové ozvučnice. Z průběhu charakteristiky je vidět zvlnění na frekvencích od 2 kHz, které je způsobeno difrakcí na zadní hraně ozvučnice.



Obr. 2.5: Frekvenční charakteristika polokulové ozvučnice cit.[5]

2.3 Válcová ozvučnice

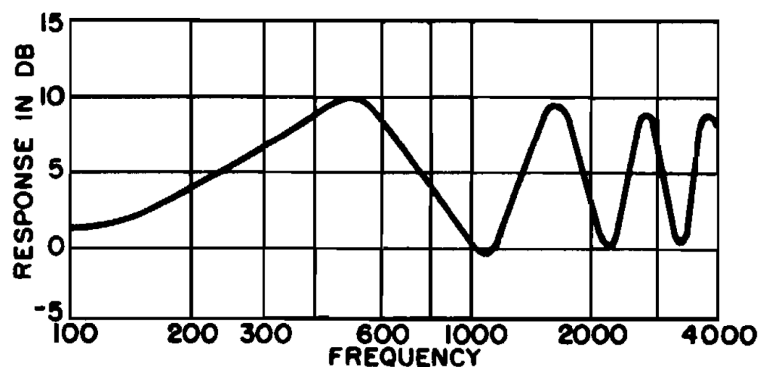
Válcovou ozvučnici můžeme mít dvojího druhu. Prvním možným provedením je osadit ozvučnici reproduktorem v čele válce (obr.2.6), tím dosáhneme, že čelo ozvučnice má kruhový tvar a boky jsou v celé délce zaoblené. Druhým možným provedením je osadit reproduktor do boku válce (obr.2.6). Čelo ozvučnice má tudíž z bočních stran hrany zaoblené po celé délce a spodní i vrchní část je kruhového tvaru a svírají pravý úhel.



Obr. 2.6: Válcové ozvučnice: vlevo ozvučnice naležato a vpravo ozvučnice nastojato

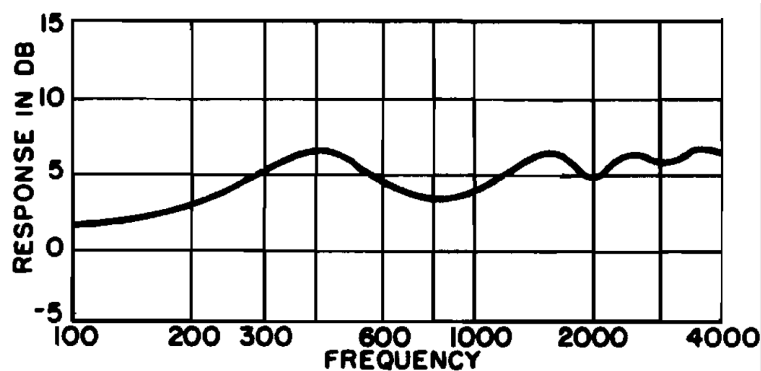
V prvním případě, kdy je reproduktor osazen ve středu čela válcové ozvučnice s poloměrem 60 cm, délkou válce 60 cm a vzdáleností použitého reproduktoru od hran ozvučnice 30 cm. Na hranách, které mají díky kruhovému tvaru po celém obvodu stejnou vzdálenost, dochází k vzniku silných difrakcí, jejichž vzdálenost od

místa vzniku hlavní zvukové vlny je rovna 30 cm. Tato vzdálenost odpovídá frekvenci $f_h=1100$ Hz. Z kmitočtové charakteristiky obr.2.7 je vidět, jak tyto difrakce ovlivní výslednou kmitočtovou charakteristiku, kdy dojde ke vzniku hřebenového filtru. Maxima hřebenového filtru jsou na kmitočtech 550 Hz, 1650 Hz, 2750 Hz, 3850 Hz, a minima na kmitočtech 1100 Hz, 2200 Hz a 3300 Hz. Z těchto hodnot je zřejmé, že maxima jsou násobky $\frac{f_h}{2}$ a minima násobky f_h .



Obr. 2.7: Frekvenční charakteristika válcové ozvučnice naležato cit.[5]

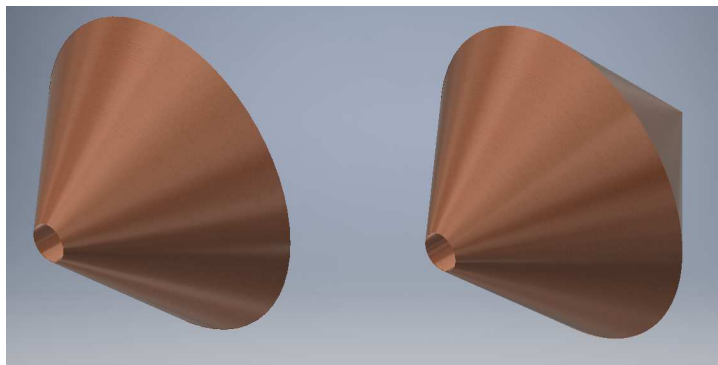
V druhém případě je reproduktor umístěn do zaoblené části ozvučnice se shodnými rozměry jako v prvním případě. Vzdálenost hrany od reproduktoru je v různých směrech jiná a tímto umístěním dojde k tomu, že vznik difrakcí není závislý pouze na jedné hodnotě vzdálenosti hran. Z kmitočtové charakteristiky obr.2.8 je vidět, že maxima a minima nejsou tak výrazná jako v prvním případě.



Obr. 2.8: Frekvenční charakteristika válcové ozvučnice nastojato cit.[5]

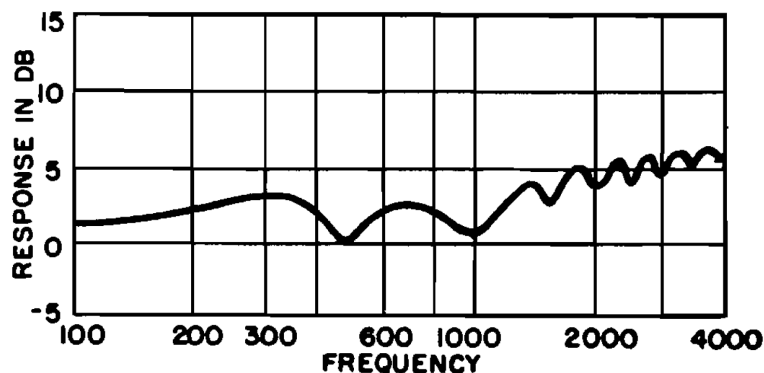
2.4 Kuželová ozvučnice

Kuželovou konstrukci ozvučnice můžeme mít dvojího druhu. V prvním případě se jedná o jednoduchý kužel (obr.2.9), který má ve svém vrcholu umístěný reproduktor. Velikost podstavy tohoto kuželu je 60 cm s výškou 30 cm a úhlem úkosu 45° . Druhou možností využití kuželové ozvučnice je oboustranný kužel (obr.2.9). Ten je tvořen dvěma kužely s podstavami u sebe a stejnými rozměry jako v prvním případě a reproduktor je uložen v jedné ze špic kuželu.



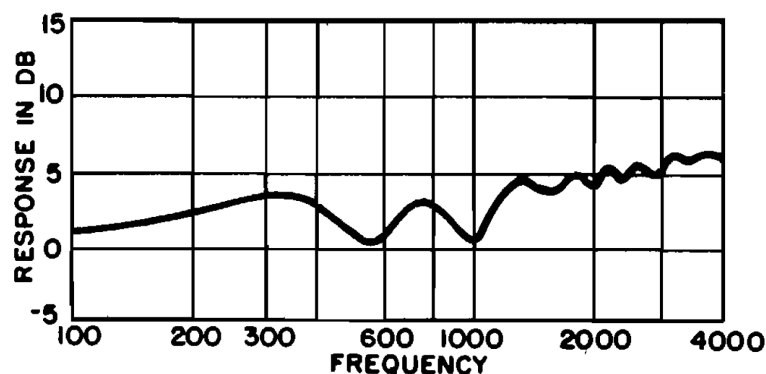
Obr. 2.9: Kuželové ozvučnice: vlevo ozvučnice jednoduchého kuželu a vpravo ozvučnice oboustranného kuželu

U jednoduchého kuželu vznikají difrakce na hraně podstavy, jejíž vzdálenost od reproduktoru je 39 cm. Vzdálenost mezi rovinou reproduktoru a podstavou činí 29 cm. Z těchto vzdáleností lze odvodit vlnovou délku zpoždění primárních vln a vln vzniklých difrakcí. Zpoždění odpovídá vlnové délce 68 cm a frekvenci $f_h=500$ Hz. Na kmitočtové charakteristice (obr.2.10) je vidět její zvlnění s maximy na frekvencích 250 Hz, 750 Hz, 1250 Hz atd. Tyto maxima jsou vždy na násobku $\frac{f_h}{2}$. Minima v kmitočtové charakteristice nabývají hodnot 500 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz atd., jedná se o násobek frekvence f_h .



Obr. 2.10: Frekvenční charakteristika jednoduché kuželové ozvučnice cit.[5]

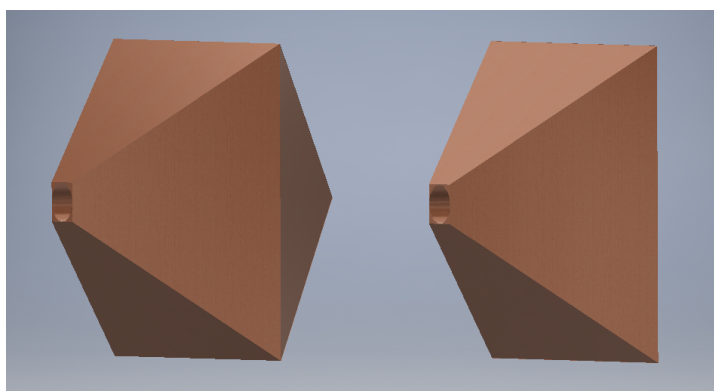
U oboustranného kuželu vznikají difrakce opět na hraně základny, tak jak tomu bylo u jednoduchého kuželu. Díky tomu jednotlivé vzdálenosti, zpoždění a výsledné hodnoty maxim a minim ve výsledné kmitočtové charakteristice (obr.2.11) zůstávají stejné jako u jednoduchého kuželu.



Obr. 2.11: Frekvenční charakteristika oboustranné kuželové ozvučnice cit.[5]

2.5 Jehlanová ozvučnice

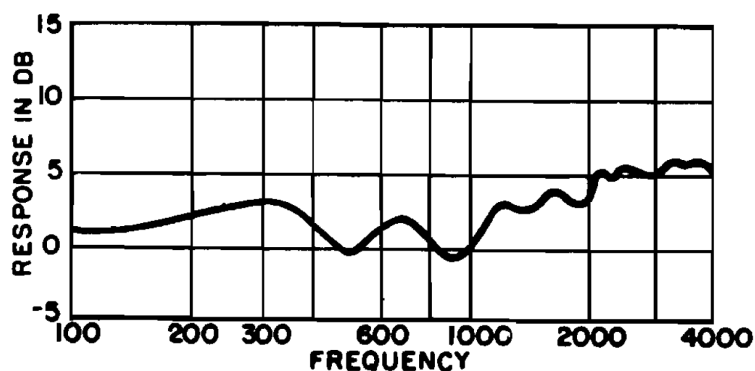
Jehlanovou konstrukci ozvučnice můžeme mít opět dvojího druhu, stejně jako tomu bylo v případě kuželové ozvučnice. V prvním případě se jedná o jednoduchý čtyřstranný jehlan (obr.2.12) s rozměry základny 60×60 cm, výškou 30 cm a uhlím zkosení stran 45° , kde v jeho vrcholu je umístěn reproduktor. Druhou verzí je oboustranný jehlan (obr.2.12), který vychází z jednoduchého jehlanu.



Obr. 2.12: Jehlanové ozvučnice: vlevo ozvučnice oboustranného jehlanu a vpravo ozvučnice jednoduchého jehlanu

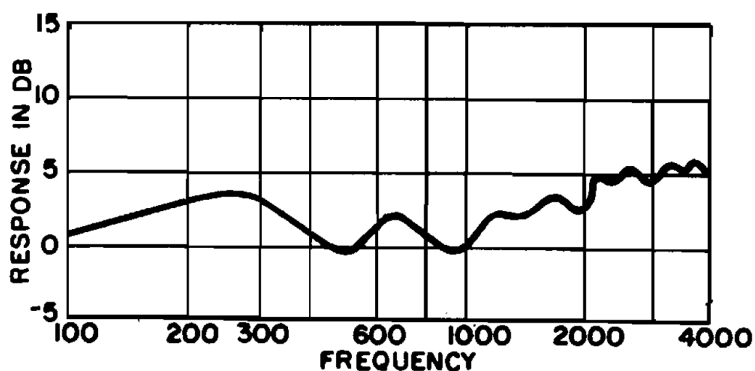
Při tvaru ozvučnice jednoduchého jehlanu vznikají difrakce na hraně jeho podstavu. Průměrná vzdálenost hrany a reproduktoru je 49 cm a vzdálenost mezi rovinou

reproduktoru a podstavou činí 29 cm. Vzdálenost místa vzniku primárních vln a vln vzniklých difrakcí je tudíž 78 cm. Tato vzdálenost odpovídá frekvenci $f_h=440$ Hz, pro vlnu vlnové délky srovnatelné s touto vzdáleností. Z kmitočtové charakteristiky (obr.2.13) je vidět jak difrakce zvlní průběh charakteristiky. Maxima se zde vyskytují na kmitočtech 220 Hz, 660 Hz, 1100 Hz atd., jedná se o násobky $\frac{f_h}{2}$. Minima nabývají hodnot 440 Hz, 880 Hz, 1320 Hz atd., kde se jedná o násobky frekvence f_h .



Obr. 2.13: Frekvenční charakteristika jednoduché jehlanové ozvučnice cit.[5]

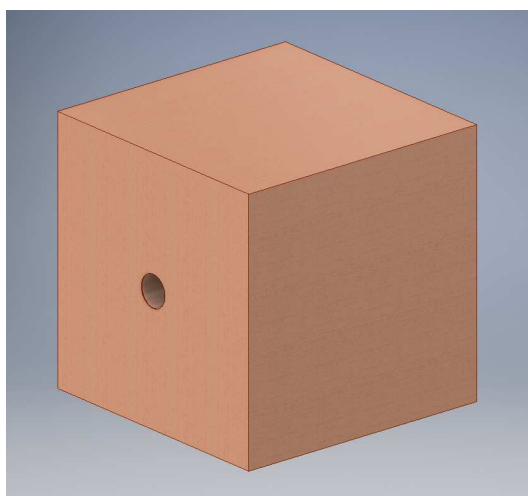
U oboustranného jehlanu vznikají difrakce opět na hraně základny, tak jak tomu bylo u jednoduchého jehlanu. Díky tomu jednotlivé vzdálenosti, zpoždění, frekvence f_h a výsledné hodnoty maxim a minim ve výsledné kmitočtové charakteristice (obr.2.14) zůstávají stejné jako u jednoduchého jehlanu.



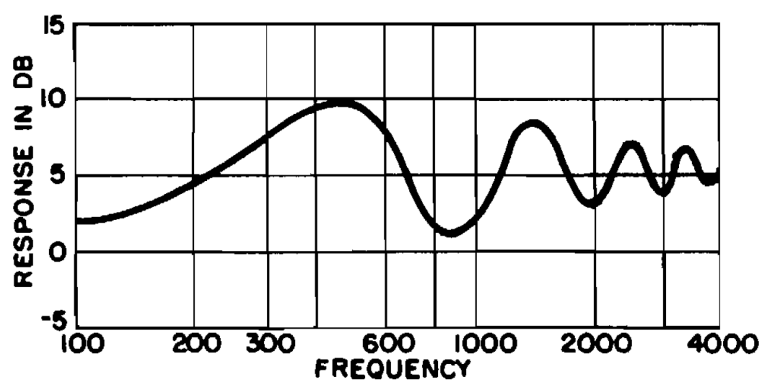
Obr. 2.14: Frekvenční charakteristika oboustranné jehlanové ozvučnice cit.[5]

2.6 Krychlová ozvučnice

Reproduktor je umístěn do středu jedné strany krychle (obr.2.15) o rozměrech $60 \times 60 \times 60$ cm ($\check{S} \times V \times H$). Na ostrých hranách ozvučnice dochází ke vzniku silných difrakcí, které ovlivňují výslednou kmitočtovou charakteristiku. Průměrná vzdálenost reproduktoru od hran ozvučnice je 36 cm. Tato vzdálenost odpovídá vlnové délce, o kterou je posunuté vlnění vznikající na hranách ozvučnice, a frekvenci $f_h=920$ Hz. Díky difrakcím na hranách vzniká v kmitočtové charakteristice obr.2.16 hřebenový filtr s maximy na 460 Hz, 1380 Hz, 2300 Hz a 3200 Hz, kdy se jedná o násobky $\frac{f_h}{2}$, a minimy 920 Hz, 1840 Hz a 2760 Hz neboli násobky f_h .



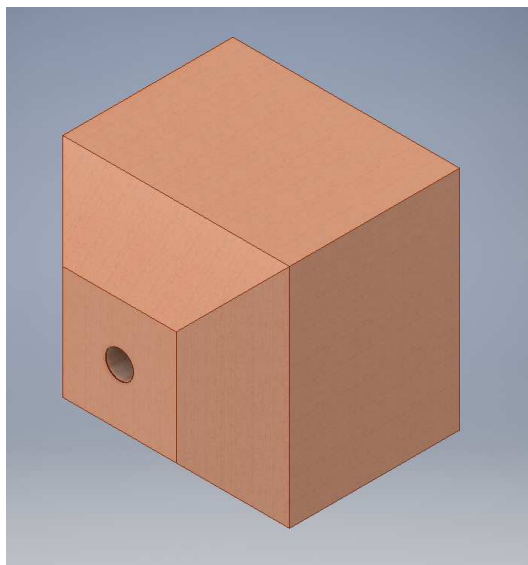
Obr. 2.15: Krychlová ozvučnice



Obr. 2.16: Frekvenční charakteristika krychlové ozvučnice cit.[5]

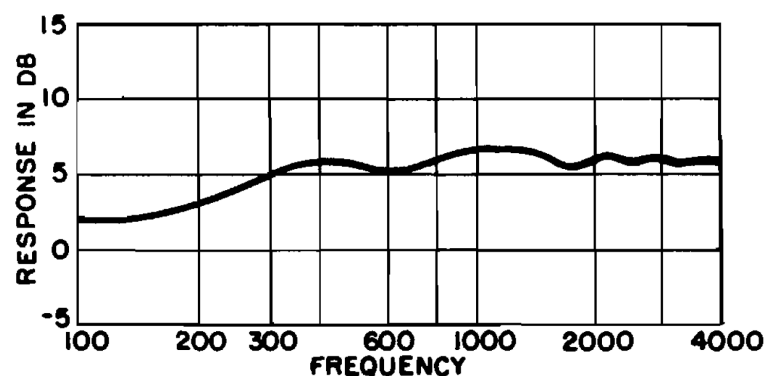
2.7 Krychlová ozvučnice se zkosenými hranami

Tato ozvučnice vznikne kombinací krychlové ozvučnice s ozvučnicí tvaru jehlanu, které byly uvedeny v předchozích kapitolách. Na obr.2.17 je vidět výsledný tvar této ozvučnice, kde zkosením hran krychle okolo reproduktoru dosáhneme oslabení vzniku difrakcí. Zkosení hran ozvučnice je pod úhlem 45° a hloubkou 15 cm. Přední část ozvučnice, ve které je reproduktor umístěn, nabývá rozměrů 30×30 cm a hloubka zadních bočnic je 30 cm.



Obr. 2.17: Krychlová ozvučnice se zkosenými hranami

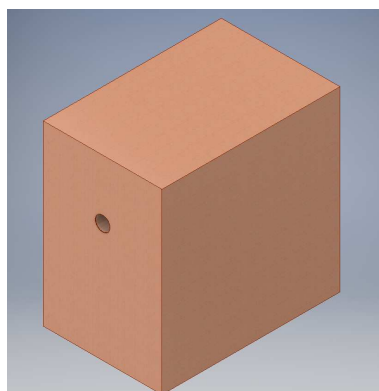
Při porovnání kmitočtových charakteristik krychlové ozvučnice (obr.2.16) a ozvučnice se zkosenými hranami (obr.2.18) lze z jejich rozdílných průběhů vidět vliv zkosení hran na výslednou kmitočtovou charakteristiku. Díky zkosení všech hran v přední části ozvučnice dojde k znatelné eliminaci difrakcí a vyrovnaní kmitočtové charakteristiky. Zvlnění s maximy na 460 Hz, 1380 Hz, 2300 Hz, 3200 Hz a minimy na 920 Hz, 1840 Hz a 2760 Hz je znatelně potlačeno.



Obr. 2.18: Frekvenční charakteristika krychlové ozvučnice se zkosenými hranami cit.[5]

2.8 Kvádrová ozvučnice

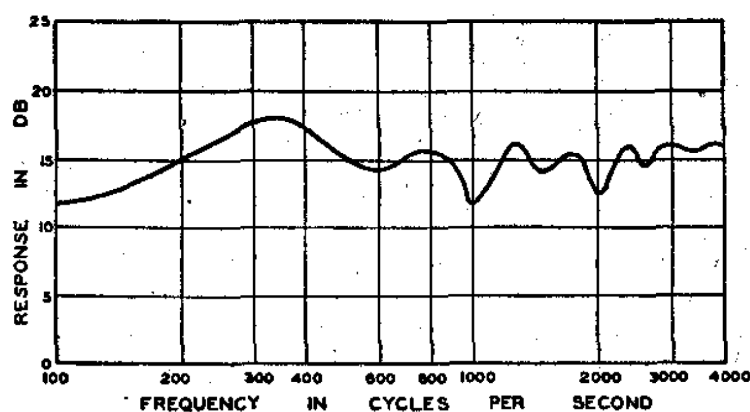
Kvádrová ozvučnice (obr.2.19) je nejrozšířeněji používaným druhem ozvučnic z důvodu jejího snadného zhotovení, z hlediska vzniku difrakcí na jejích hranách se ale nejedná o ideální konstrukci. Na hranách se zde uplatní silný vliv difrakcí stejně jako u krychlové ozvučnice, které ovlivní výslednou kmitočtovou charakteristiku reproduktorové soustavy. Díky obdélníkovému tvaru přední desky budou vzdálenosti reproduktoru od hran vždy jiné a vliv difrakcí se nebude uplatňovat v takové míře jako u krychlové ozvučnice. Ideálně by měl být reproduktor umístěn tak, aby žádná ze vzdáleností k hranám nebyla soudělná. V našem případě byl reproduktor umístěn do ozvučnice tak, že vzdálenosti vrchní a bočních hran od reproduktoru byly shodné a vzdálenost spodní hrany byla dvojnásobná.



Obr. 2.19: Kvádrová ozvučnice

Z průběhu kmitočtové charakteristiky (obr.2.20) je vidět vliv difrakcí, kdy minima jsou na kmitočtech 1000 a 2000 Hz, které jsou dány kratší vzdáleností vrchní hrany a bočních hran od reproduktoru. Minimum na kmitočtu 500 Hz je způsobeno

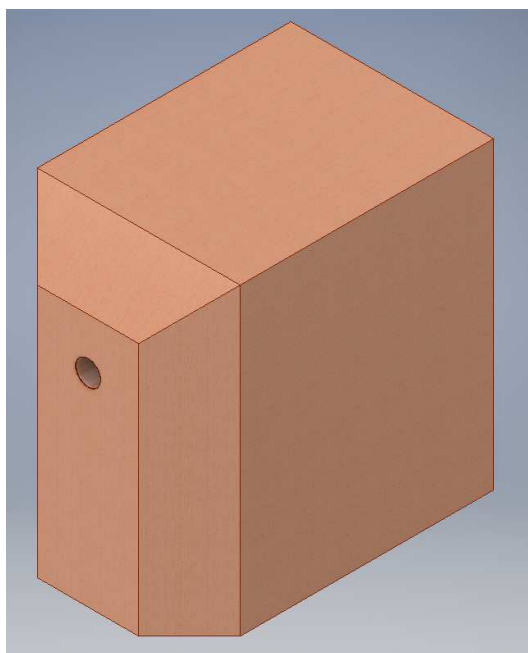
vzdáleností difrakcí na spodní hraně s delší vzdáleností.



Obr. 2.20: Frekvenční charakteristika kvádrové ozvučnice cit.[4]

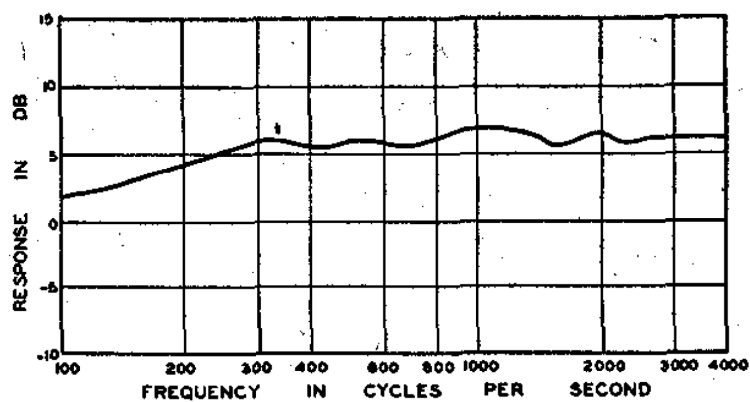
2.9 Kvádrová ozvučnice se zkosenými hranami

Zkosením hran kvádrové ozvučnice, uvedené v předchozí kapitole kap. 2.8, dosáhneme eliminace vzniku difrakcí, které způsobovaly zvlnění průběhu kmitočtové charakteristiky. Na obr.2.21 je vidět výsledný tvar ozvučnice. Zkosení hran je pod úhlem 45° s hloubkou zkosení čtvrtiny celkové šířky ozvučnice.



Obr. 2.21: Kvádrová ozvučnice se zkosenými hranami

Při porovnání průběhů kmitočtových charakteristik kvádrové ozvučnice (obr.2.20) a kvádrové ozvučnice se zkosenými hranami (obr.2.22) je vidět, že díky zkosení se zbavíme zvlnění kmitočtové charakteristiky a dosáhneme tak hladších průběhů.



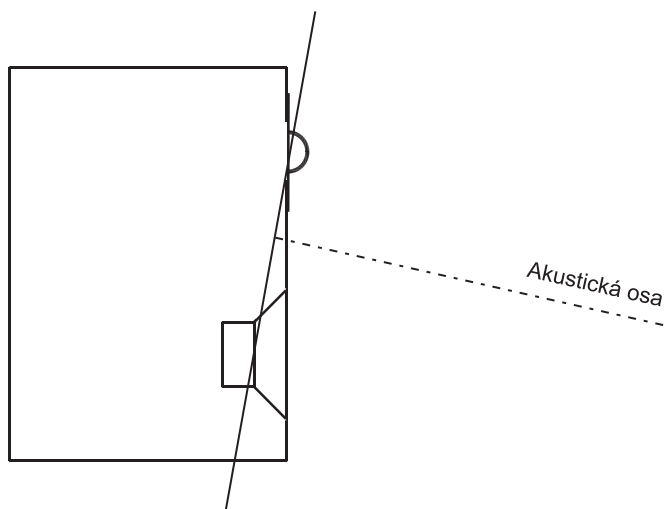
Obr. 2.22: Frekvenční charakteristika kvádrové ozvučnice se zkosenými hranami
cit.[4]

3 Vzájemná poloha reproduktorů v dvoupásmové ozvučnici

V této kapitole čerpám teoretické poznatky z literatury [1] [2].

Mechanické uspořádání reproduktorů v ozvučnici má kromě vlivu na výslednou kmitočtovou charakteristiku také vliv na směrovou charakteristiku soustavy. Při použití dvou a více reproduktorů v reproduktorové soustavě je zapotřebí vyřešit jejich vzájemnou polohu, která sama o sobě má vliv na výslednou směrovou charakteristiku, kmitočtovou charakteristiku a fázový rozdíl soustavy. Při vzájemné poloze reproduktoru řešíme dvě vzdálenosti. Vzdálenost akustických os reproduktorů a vzdálenost zapuštění jednoho nebo druhého reproduktoru kvůli vzájemné poloze jejich vyzařovacích bodů.

Směrová charakteristika reproduktorové soustavy je závislost akustického tlaku před ozvučnicí na úhlu, který svírá akustická osa reproduktorové soustavy s měřicím mikrofonom. Akustickou osu reproduktorové soustavy určíme tak, že vytvoříme přímkou mezi vyzařujícími body výškového a středového reproduktoru. Na této přímce vztyčíme kolmici v polovině vzdálenosti, která je naší výslednou akustickou osou reproduktorové soustavy (obr.3.1).



Obr. 3.1: Určení akustické osy reproduktorové soustavy

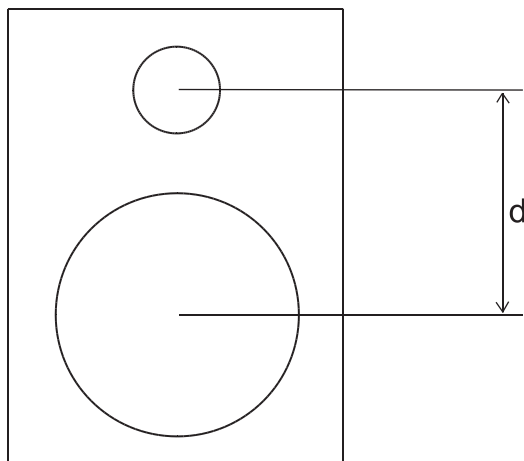
Ve směru akustické osy bude kmitočtová charakteristika vždy vyrovnaná na všech frekvencích. Mimo ni bude docházet ke zvlnění zejména na vyšších kmitočtech proto, že na nízkých frekvencích, zejména pro frekvence do 300 Hz, se zvukové vlnění šíří jako kulová vlna neboli všesměrově. S rostoucím kmitočtem se směrovost vlnění rychle zvyšuje a pro frekvence nad 5000 Hz je vyzařovací charakteristika již úzce směrová.

3.1 Vzdálenost akustických os

Pro dvoupásmové soustavy je důležitým faktorem, který ovlivňuje směrovou charakteristiku, vzdálenost akustických os jednotlivých reproduktorů. Vzdálenost akustických os použité dvojice reproduktorů by měla být co nejmenší, v nejlepším případě $\frac{1}{4}$ vlnové délky dělicího kmitočtu. Této vzdálenosti je ve většině případů nerealizovatelná z důvodu konstrukce a rozměrů použitých reproduktorů, a proto používáme vzdálenost $\frac{5}{4}$ vlnové délky dělicího kmitočtu. Pro výpočet vzdálenosti používáme vzorec

$$d = \frac{5}{4} \cdot \frac{v_z}{f_d}, \quad (3.1)$$

kde f_d je dělicí kmitočet mezi sousedními reproduktory a v_z rychlost zvuku.

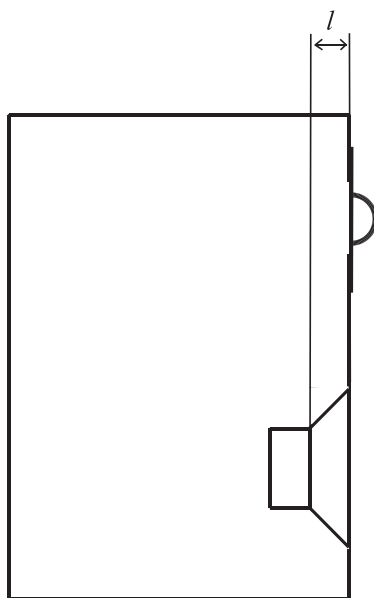


Obr. 3.2: Vzdálenost reproduktorů

S rostoucí vzdáleností reproduktorů dochází k tomu, že se nám mění úhel výsledné akustické osy reproduktorové soustavy a s ní i směr hlavního laloku ve směrové charakteristice. Dalším jevem je, že dochází k rozdrobení vedlejších laloků ve směrové charakteristice. To má za příčinu, že výsledná kmitočtová charakteristika bude více závislá na pozici posluchače před reproduktorovou soustavou. Se zvyšujícím se úhlem posluchače od akustické osy soustavy bude docházet k většímu zvlnění kmitočtové charakteristiky na vyšších kmitočtech kvůli většímu množství přechodů mezi jednotlivými charakteristikami. Reproduktořová soustavu bude tak vhodná spíše k poslechu v kratší vzdálenosti posluchače od ozvučnice.

3.2 Vzdálenost vzájemného zapuštění

Bereme v úvahu to, že ve dvoupásmových soustavách se používá kombinace reproduktorů tak, aby každý z nich pokryl určenou část výsledného spektra. Reprodukory určené pro reprodukci vyšších frekvencí jsou menší konstrukce než reproduktory určené pro produkci nižších frekvencí. Z čeho vyplývá, že jejich vyzařovací bod je v menší vzdálenosti od úchyty reproduktoru. Vzájemná vzdálenost vyzařovacích bodů reproduktorů nám ovlivňuje dva parametry výsledné reproduktorové soustavy, které mají vliv na fázový posun a výslednou směrovou charakteristiku.



Obr. 3.3: Vzájemná hloubka zapuštění

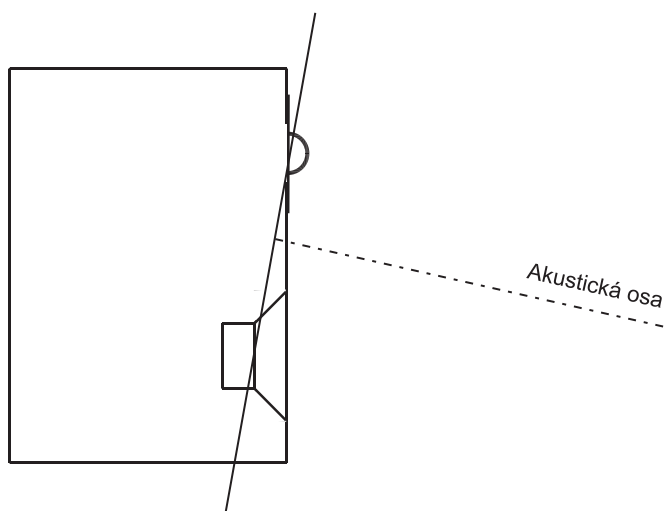
Prvním parametrem je fázový posun zvukových signálů produkovaných jednotlivými reproduktory. V případě, že reproduktory jsou umístěny na kolmé přední straně ozvučnice, tak jejich vyzařovací body jsou vůči sobě posunuty. Tímto posunem dochází k tomu, že reproduktor se vzdálenějším vyzařovacím bodem od přední desky ozvučnice je vůči druhému reproduktoru opožděn, a dochází k fázovému posunu. Tento posun lze eliminovat buď na straně kmitočtové výhybky, přidáním do jejich obvodů fázovacích článků nebo také zapuštěním jednoho reproduktoru tak, aby vyzařovací body byly v jedné rovině nad sebou.

Druhý parametr je sklon vyzařovací osy reproduktorové soustavy, kdy se zapuštěním reproduktorů mění vzájemná poloha jejich vyzařovacích bodů a tím je ovlivněn úhel výsledné akustické osy soustavy. Kromě změny vzájemné vzdálenosti vyzařovacích bodů lze ovlivnit úhel akustické osy na straně výhybky, kdy strmostí a použitím příslušné aproximace ovlivníme i úhel akustické osy. V následujících podkapitolách

se budeme zabývat mechanickou analogií zapuštění reproduktorů a jejím vlivem na sklon akustické osy soupravy.

3.2.1 Reproductory v rovině s ozvučnicí

Pokud jsou oba reproduktory umístěny na přední část ozvučnice (obr.3.4), jejich vyzařovací body neleží v jedné rovině nad sebou a výsledná akustická osa bude skloněna dolů. Pokud nebude sklon akustické osy ovlivněn na straně výhybky, bude zapotřebí mít tuto reproduktorovou soustavu umístěnou nad úrovní posluchače tak, aby akustická osa procházela místem poslechu.

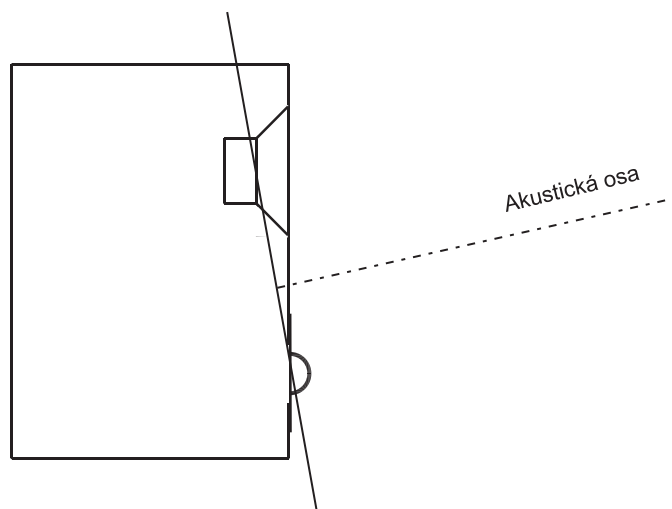


Obr. 3.4: Reproductory v rovině s přední stranou ozvučnice

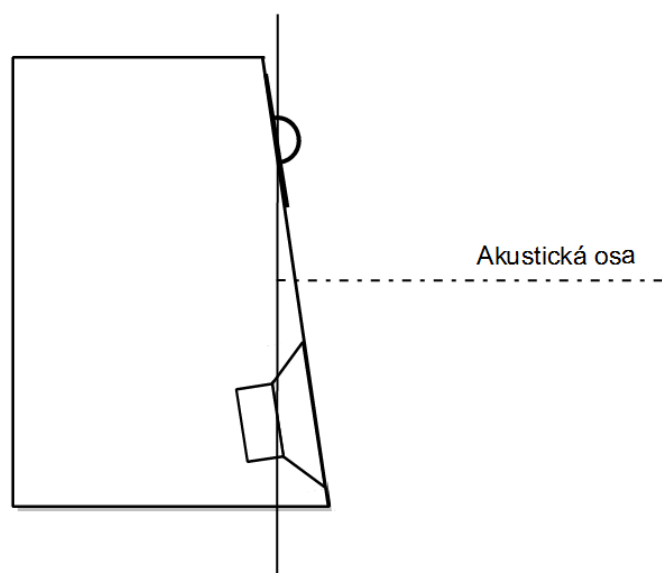
V případě, že pozice výškového a středobasového reproduktoru budou otočeny (obr.3.5) dojde k tomu, že akustická osa soustavy bude směřovat nahoru. V běžných rozmístěních soustav v prostoru bude tato konfigurace nepoužitelná, protože akustická osa bude směřovat nad místo poslechu.

3.2.2 Reproductory v nakloněné ozvučnici

Uspořádání reproduktorů je stejné jako v předchozím případě, kdy výškový reproduktor je umístěn nad středobasovým reproduktorem, ale přední část ozvučnice je zešíkmená (obr.3.6), nejedná se tedy o klasickou kvádrovou ozvučnici. Zešíkmením přední části, ve které jsou reproduktory umístěny, dosáhneme toho, že vyzařovací body obou použitých reproduktorů jsou v jedné rovině nad sebou. Díky tomu je výsledná akustická osa reproduktorové soustavy rovnoběžná s rovinou podstavu.



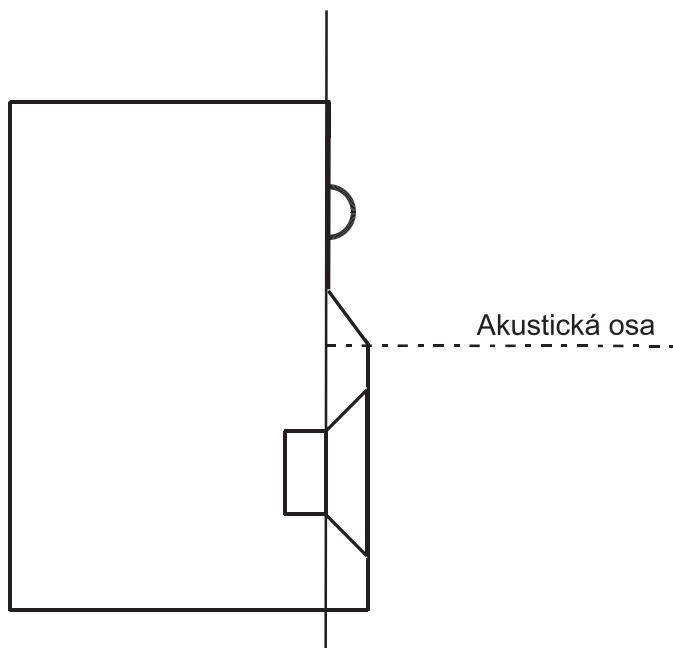
Obr. 3.5: Reprodukory v rovině s přední stranou ozvučnice



Obr. 3.6: Reprodukory v nakloněné ozvučnici

3.2.3 Vyrovnání vyzářovacích bodů

Další možností, jak docílit toho, že výsledná akustická osa zkonstruované reproduktorové soustavy bude rovnoběžná s podstavou, je zapustit výškový reproduktor vůči středobasovému reproduktoru do ozvučnice (obr.3.7). Tím dosáhneme toho, že vyzářovací body reproduktorů jsou opět v jedné rovině nad sebou. Při zapouštění reproduktoru je potřeba myslet na to, abychom nevyrobili ostré hrany, na kterých by mohlo docházet k difrakcím, a neovlivnili tak výslednou kmitočtovou charakteristiku.



Obr. 3.7: Zapuštění výškového reproduktoru

4 Měření vlastností reproduktorů a reproduktorových soustav

V této kapitole čerpám teoretické poznatky z literatury [6].

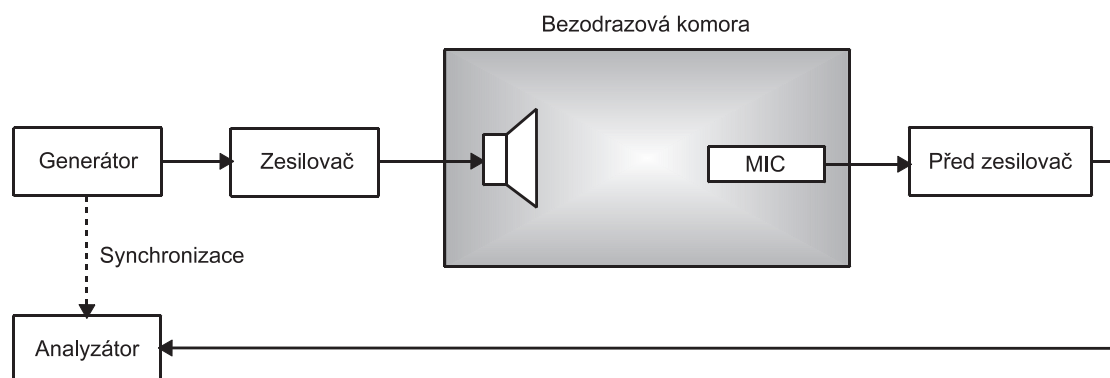
Pro zjištění kvality reprodukováného signálu reproduktorů a reproduktorových soustav jsou nejčastěji používány frekvenční a směrové charakteristiky. Z jejich průběhu lze snadno určit základní vlastnosti a rozhodnout, zda jsou vhodné pro požadované účely.

4.1 Frekvenční charakteristika

Jedná se o závislost akustického tlaku v akustické ose reproduktoru nebo reproduktorové soustavy na konstantním vstupním napětí. Z této závislosti lze odečíst efektivní frekvenční rozsah měřeného zařízení.

Akustická osa reproduktoru vychází ze středu membrány a je kolmá k magnetu reproduktoru. Pro určení akustické osy reproduktorových soustav záleží na vzájemné poloze reproduktorů v ozvučnici (kap.3), kdy výsledná akustická osa může být shodná s akustickou osou výškového reproduktoru, a nebo prochází geometrickým středem použitých reproduktorů.

Měření frekvenční charakteristiky reproduktorů probíhá ve volném prostoru nebo v bezdrazové komoře, kdy se změří průběh akustického tlaku dle druhu měření – v akustické ose nebo mimo akustickou osu.



Obr. 4.1: Zapojení měřicího pracoviště

Základní řetězec pro měření kmitočtové charakteristiky je zobrazen na obr.4.1. Výstupní signál z generátoru je přiveden na zesilovač, kdy dojde k jeho zesílení na požadovanou hodnotu, ze zesilovače je signál přiveden do vstupu měřeného zařízení. Před měřeným zařízením je umístěný měřicí mikrofón ve vzdálenosti, která zůstává

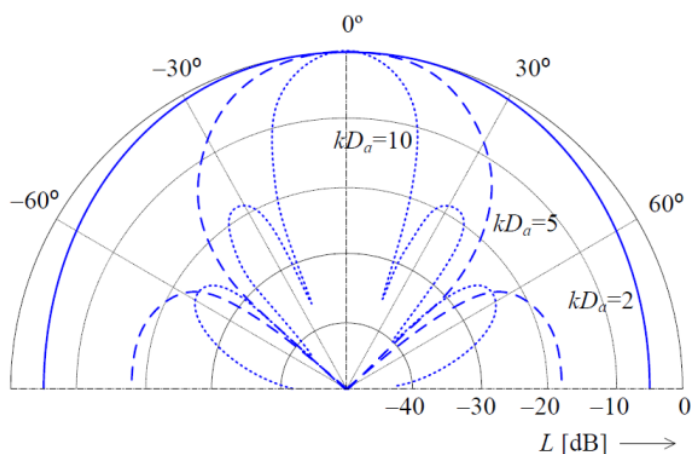
po celou dobu měření konstantní tak, aby jeho citlivost byla kmitočtově nezávislá v měřeném směru. Vzdálenost měřicího mikrofону od zařízení by měla být z pravidla minimálně třikrát větší, než je průměr membrány měřeného reproduktoru. Změřená hodnota akustického tlaku poté putuje do analyzátoru, kde dochází k vyhodnocení měření.

Ze změřeného průběhu frekvenční charakteristiky lze zjistit efektivní frekvenční rozsah, který se udává pro pokles frekvenční charakteristiky o 10 dB oproti průměrné hodnotě akustického tlaku v oktákových pásmech. Déle se také často uvádí frekvenční rozsah pro pokles 3 dB.

4.2 Směrová charakteristika

Směrová charakteristika je dalším druhem frekvenční charakteristiky, kde je navíc znázorněná závislost úhlu měřicího mikrofónu vůči akustické ose měřeného zařízení. Ze směrové charakteristiky lze určit vyzařovací úhel zařízení a také určit, zda se bude jednat o zařízení vhodné pro blízký poslech, kdy pozice posluchače ovlivní výsledný vjem, nebo pro plošné ozvučení.

Směrová charakteristika je vynášena jako polární diagram akustického tlaku v konstantní vzdálenosti od reproduktoru v závislosti na úhlu α při stejném kmitočtu (obr.4.2)



Obr. 4.2: Směrová charakteristika pístově kmitající kruhové membrány cit. [1]

Vyzařovací úhel měřeného zařízení je úhel mezi akustickou osou zařízení a směrem, ve kterém klesne hodnota hladiny akustického tlaku o 10 dB oproti hladině akustického tlaku změřeného v akustické ose zařízení.

5 Postup při návrhu a realizaci ozvučnic dvou-pásmových soustav

V této kapitole je uveden podrobný postup krok po kroku, kterého je dobré se při navrhování a realizaci dvoupásmové ozvučnice držet, aby bylo dosaženo co nejlepšího řešení finálního produktu. Postup lze aplikovat i na jiná řešení reproduktorových soustav.

1. **Výběr reproduktorů dle parametrů udávaných výrobcem** – při konstrukci dvoupásmové reproduktorové soustavy je zapotřebí vybrat dvojici reproduktorů tak, aby bylo dobře pokryto požadované pásmo reprodukováných kmitočtů. Při výběru reproduktorů se řídíme zejména kmitočtovými charakteristikami a Thiele-Smallovými parametry udávanými výrobcem.
2. **Provedení simulace středobasového reproduktoru dle parametrů výrobce** – dle Thiele-Smallových parametrů udávaných výrobcem lze díky dobře dostupným simulačním programům získat dostatečnou představu o funkčnosti středobasového reproduktoru a o typu nejvhodnější ozvučnice a jejího objemu.
3. **Měření reálných vlastností reproduktorů** – u vybraných reproduktorů je zapotřebí provést měření jejich skutečných vlastností, protože velmi často se hodnoty TS parametrů udávané výrobcem a skutečné hodnoty TS parametrů značně liší. To platí i pro stejné reproduktory, kdy dva totožné reproduktory mohou mít zcela rozdílné vlastnosti.

U středobasového reproduktoru měříme impedanční charakteristiku na volně ležícím reproduktoru, z které lze vypočítat stěžejní TS parametry. Dále je reproduktor vhodné umístit do ozvučnice známého vnitřního objemu, dle předchozích simulací, a měření impedanční charakteristiky opakovat. Z naměřených impedančních charakteristik a z nich zjištěných reálných TS parametrů lze dopočítat skutečnou hodnotu ekvivalentního objemu reproduktoru V_{as} .

Pro oba reproduktory dále změříme jejich kmitočtové charakteristiky, které použijeme k přesnější simulaci a ladění reproduktorové ozvučnice.

4. **Provedení simulací dle skutečných parametrů** – po změření skutečných vlastností reproduktorů se vrátíme zpátky k provedení simulací, tentokrát již s reálnými parametry.
5. **Určení druhu a rozměru ozvučnice na základě provedených simulací** – z průběhu simulací středobasového reproduktoru vybereme jednu ze tří základních typu ozvučnic: otevřená ozvučnice, uzavřená ozvučnice a ozvučnice typu bassreflex.

Při použití otevřené ozvučnice je potřeba při určování rozměrů ozvučnice dbát na délku bočnic dle teoretických předpokladů. V případě uzavřené ozvučnice

a ozvučnice typu bassreflex určujeme její rozměry tak, aby bylo docíleno potřebného vnitřního objemu ozvučnice. U ozvučnice typu bassreflex dále určíme rozměry a délku bassreflexového nátrubku dle odsimulovaných parametrů.

6. **Určení vzájemné polohy reproduktorů** – pro určení vzájemné polohy je v první řadě potřeba brát v úvahu jejich dělicí kmitočty. Vzdálenost akustických os by měla být v ideálním případě $1/4$ vlnové délky dělicího kmitočtu. Této vzdálenosti nelze ve většině případů dosáhnout kvůli velkým rozměrům reproduktorů, a proto se v praxi tedy běžně volí $5/4$ vlnové délky mezního kmitočtu.

V druhé řadě je zapotřebí řešit zřazování reproduktorů, neboli jejich vzájemné o zapuštění. Protože výškový reproduktor nabývá daleko menších rozměrů než středobasový reproduktor, je potřeba dostat jejich vyzařovací body přesně nad sebe. Z toho důvodu bývá výškový reproduktor zapuštěn do ozvučnice oproti středobasu tak, aby jejich vyzařovací body byly kolmo nad sebou vzhledem k jejich osám.

V poslední řadě řešíme pozici výškového reproduktoru vzhledem k hranám ozvučnice z důvodu eliminace difrakcí vznikajících na hranách. Pokud výškový reproduktor není ve středu ozvučnice, nedochází k tak silnému ovlivnění kmitočtové charakteristiky difrakcemi, ale dochází k ovlivnění směrové charakteristiky v okolí dělicího kmitočtu.

7. **Volba tvaru ozvučnice pro omezení difrakcí zvukového vlnění** – po určení vzájemné polohy reproduktorů ozvučnice a potřebného vnitřního objemu je zapotřebí určit výsledný tvar a rozměry ozvučnice. Nejprve je dobré určit rozměry přední desky ozvučnice tak, aby byla dodržena vzájemná poloha reproduktorů určená v předchozím kroku. Vzdálenost reproduktorů od hran ozvučnice by měla být pokud možno co nejmenší kvůli difrakcím na nich vznikajících. Dále je potřeba vzniklé hrany zaoblit nebo srazit co nejblíže k reproduktorům a tím eliminujeme vliv difrakcí na výslednou kmitočtovou charakteristiku.
8. **Tlumení stojatého vlnění** – do ozvučnice umístíme materiál pro tlumení stojatého vlnění, který zamezí jeho vzniku a ovlivnění kmitočtové charakteristiky. Pro tlumení stojatého vlnění lze použít jednu z následných metod: tlumení na stěny, tlumení na výztuhu nebo metodu zigzag.
9. **Měření kmitočtových a směrových charakteristik reproduktorů v realizované ozvučnici** – po zhotovení a osazení ozvučnice reproduktory je zapotřebí změřit výsledné kmitočtové a směrové charakteristiky jednotlivých reproduktorů.
10. **Návrh kmitočtové výhybky dle naměřených dat** – do simulačních programů lze naimportovat data změřených kmitočtových charakteristik a díky

tomu provést přesný návrh kmitočtové výhybky.

Kmitočtová výhybka je v základu sestavená z horní propusti pro výškový reproduktor a dolní propusti pro středobasový reproduktor, ale pro dosažení vyrovnané kmitočtové charakteristiky je zapotřebí přidat další typy filtrů a obvodů. Z pravidla se pro výškový reproduktor přidává útlumový článek, protože citlivost výškového reproduktoru je vyšší než středobasového, a dále přidáváme například korekční obvody typu baffle step a zobelovy korekce.

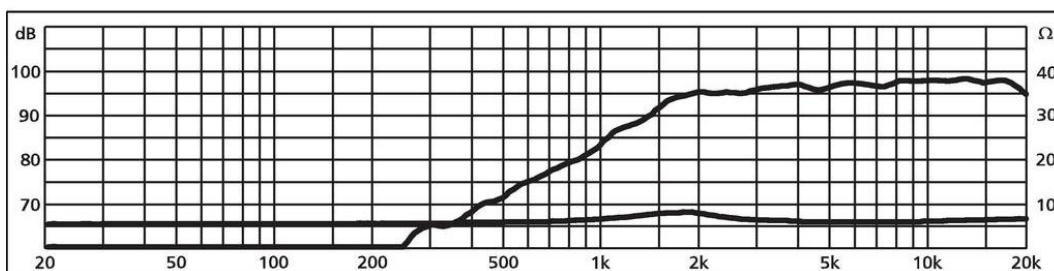
11. **Změření výsledných kmitočtových a směrových charakteristik** – po zhotovení kmitočtové výhybky změříme výsledné kmitočtové a směrové charakteristiky celé reproduktorové soustavy.
12. **Optimalizace kmitočtových výhybek z naměřených** – v některých případech se stává, že i přes provedení přesného návrhu dle simulací nemusí být výsledné charakteristiky reproduktorové soustavy zcela ideální. Na základě naměřených charakteristik tedy provedeme případné úpravy jednotlivých částí kmitočtové výhybky.
13. **Ověření optimalizace celého řešení** – na závěr provedeme měření výsledných kmitočtových a směrových charakteristik reproduktorové soustavy, kdy si ověříme výsledné vlastnosti zhotovené reproduktorové soustavy.

6 Návrh modulů pro měření difrakcí na ozvučnici

První sada přípravků bude určena k měření vzniku difrakcí na ozvučnici a jejich vlivu na kmitočtovou charakteristiku. Pro měření jsem vybral šest tvarů ozvučnic, na kterých budeme moci demonstrovat vliv difrakcí na výslednou kmitočtovou charakteristiku reproduktorové soustavy. Při měření bude možné použít, a to díky umístění reproduktoru do trubice. Tím nebude docházet ke zkreslení naměřených hodnot z důvodu, že stejný model měniče může mít jiné vlastnosti. Měření bude probíhat v bezodrazové komoře, kde zamezíme vzniku difrakcí v prostoru a jediné difrakce ovlivňující výslednou kmitočtovou charakteristiku budou ty, co vznikají na hranách ozvučnice.

6.1 Pouzdro výškového reproduktoru

K měření difrakcí na ozvučnici bude použit reproduktor Monacor DT-25N. Z kmitočtové charakteristiky (obr.6.1) udávané výrobcem je zřejmé, že tento reproduktor dostatečně pokryje kmitočtové pásmo v rozsahu od 2 kHz do 20 kHz.

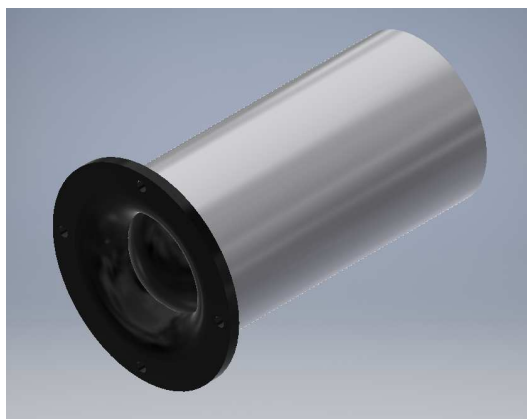


Obr. 6.1: Frekvenční charakteristika výškového reproduktoru Monacor DT-25N

Vložením reproduktoru do plastové trubice s vnějším průměrem 50 mm (obr.6.2) dosáhneme možnosti vkládat jeden reproduktor do všech ozvučnic bez složitého mechanického upevňování. V každé ozvučnici bude otvor, který bude vyložkováný plastovou trubicí s vnějším rozměrem 50 mm, do které bude zajíždět výměnný modul reproduktoru. Po zasunutí modulu do ozvučnice nebude zapotřebí nijak reproduktor mechanicky upevňovat díky malé vůli mezi trubicemi modulu a vložky.

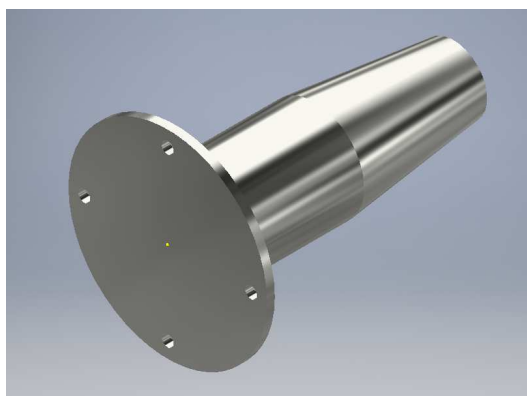
6.2 Úchyt ozvučnic pro měření

Ozvučnice musí být umístěny v prostoru tak, aby jejich uchycení nijak neovlivňovalo výsledky měření. Na zadní straně každé ozvučnice bude umístěn mezikus (obr.6.3).



Obr. 6.2: Výměnný modul výškového reproduktoru Monacor DT-25N

Jedná se o nohu k nábytku, která svými rozměry dobře poslouží k uchycení ozvučnic do mnou zvoleného stojanu a stane se tak stabilním uchycením k ozvučnici.



Obr. 6.3: Mezikus pro uchycení ozvučnic do stativu

Pro uchycení ozvučnic do volného prostoru jsem zvolil jeřábový stativ, který s v praxi používá k uchycení fotografického příslušenství. Konstrukce stojanu dovoluje nést velké váhy, a díky protizávaží upevněnému na druhém konci ramene je stojan vyvážený a dostatečně stabilní. Dostatečná délka ramene stojanu zajišťuje, že dosáhneme dostatečné vzdálenosti stojanu od ozvučnice a vliv stojanu se tak na naměřené kmitočtové charakteristiky.

6.3 Moduly pro měření vlivu difrakcí na ozvučnici

Pro měření difrakcí na ozvučnici jsem vybral šest variant ozvučnic. Tři z ozvučnic budou konstruovány jako ozvučnice typu rovinné desky s ostrými hranami. Bude se jednat o kruhovou ozvučnici s reproduktorem umístěným ve středu ozvučnice,



Obr. 6.4: Jeřábový stativ pro uchycení modulů

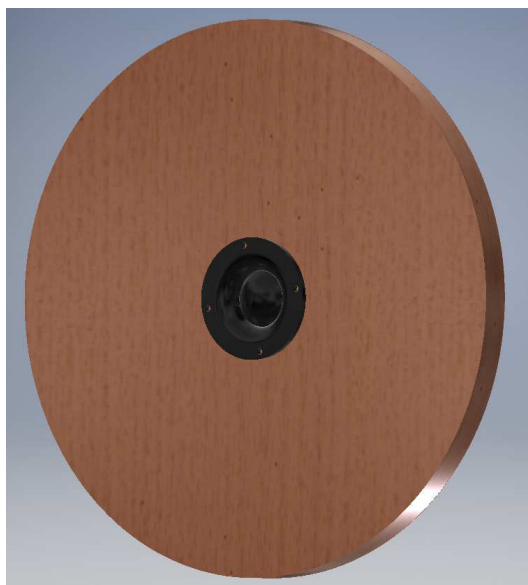
obdélníkovou ozvučnicí s reproduktorem umístěným ve středu ozvučnice a obdélníkovou ozvučnicí s reproduktorem umístěným symetricky mimo střed ozvučnice. Další dvě ozvučnice budou konstruovány jako otevřené ozvučnice se zaoblenými hranami, které budou mít obdélníkový tvar přední desky. V první bude reproduktor umístěn symetricky mimo střed a v druhém případě bude reproduktor umístěn tak, aby vzdálenosti k hranám ozvučnice nebyly soudělné. Poslední ozvučnice bude typu kapky, kde dosáhneme konstrukce ozvučnice bez nežádoucích hran a difrakcí.

Měřením kmitočtové charakteristiky reproduktoru usazeného do těchto ozvučnic si bude student moci postupně zkoušet vliv difrakcí na výslednou kmitočtovou charakteristiku od varianty, která ji ovlivňuje nejvíc, až takřka po ideální variantu, kdy bude vliv difrakcí eliminován. Díky nejčastějšímu využití obdélníkových ozvučnic v praxi jim je při měření věnován největší prostor. Studenti si budou moci vyzkoušet postupné měření od nejhorší možné konfigurace až po ideální konfiguraci.

6.3.1 Kruhová ozvučnice

Konstrukce ozvučnice bude provedena jako rovinná deska s otvorem pro modul reproduktoru umístěným ve svém středu (obr.6.5). Ozvučnice bude zhotovená z materiálu MDF o tloušťce 18 mm, průměru 30 cm a bez zapuštění hran reproduktoru.

Hrany ozvučnice zůstanou nezaoblené, aby na nich při měření záměrně vznikaly difrakce a měřením si student mohl ověřit nevýhody kruhové ozvučnice. Na zadní straně bude upevněn mezikus pro uchycení přípravku stativu.



Obr. 6.5: Kruhová ozvučnice

Vzdálenost hrany od reproduktoru bude po celém obvodu ozvučnice 15 cm a kmitočet f_h , jehož vlnová délka je shodná se vzdáleností hrany ozvučnice od reproduktoru, je 2266 Hz. Na hraně budou dle teoretických předpokladů uvedených v kap.2.3 vznikat silné difrakce, které budou ovlivňovat výslednou kmitočtovou charakteristiku. Zvlnění v kmitočtové charakteristice bude mít svá maxima na násobcích kmitočtu $\frac{f_h}{2}$ a minima na násobcích f_h .

6.3.2 Obdélníková ozvučnice s reproduktorem ve středu

Další ozvučnicí v provedení rovinné desky bude obdélníková ozvučnice, s otvorem pro modul reproduktoru umístěným ve svém středu (obr.6.6). Ozvučnice bude zhotovená z materiálu MDF o tloušťce 18 mm, délce 30 cm, šířce 13 cm a bez zapuštění hran reproduktoru. I v tomto případě budou hrany ozvučnice nezaoblené, abychom si ověřili vznik difrakcí a jejich vliv na výsledné kmitočtové charakteristiky soustavy. Ze zadní strany bude připevněn mezikus pro uchycení přípravku ke stativu.

Vznik difrakcí na hranách bude nyní ovlivněn dvěma vzdálenostmi hran od reproduktoru. První vzdálenost reproduktoru k bližší hraně je 6,5 cm a druhá vzdálenost k vzdálenější hraně je 15 cm, tyto vzdálenosti jsou ovšem jen v osách reproduktoru. Pro určení vlnové délky kmitočtu nejsilnějších difrakcí je zapotřebí vypočítat průměrnou vzdálenost k jednotlivým stranám, která je pro vzdálenější hranu přibližně



Obr. 6.6: Obdélníková ozvučnice s reproduktorem ve středu

15,7 cm a pro bližší hranu 11,4 cm. Z těchto vzdáleností je odvozen kmitočet, na kterém budou vznikat difrakce. Pro vzdálenější stranu bude kmitočet difrakcí roven 2127 Hz a pro bližší stranu 2929 Hz. Dle teoretických předpokladů uvedených v kap.2.8 bude zvlnění výsledné kmitočtové charakteristiky nabývat minim a maxim v násobcích těchto kmitočtů.

6.3.3 Obdélníková ozvučnice s reproduktorem mimo střed

Ozvučnice na obr.6.7 bude mít stejné parametry jako předešlá ozvučnice. Bude vyrobena z materiálu MDF o tloušťce 18 mm, délce 30 cm, šířce 13 cm, bez zapuštění hran reproduktoru a s ostrými hranami, aby se dal měřením ověřit vznik difrakcí a jejich vliv na výsledné kmitočtové charakteristiky soustavy. Na rozdíl od předešlé ozvučnice bude otvor pro modul reproduktoru umístěn mimo střed a to tím způsobem, aby vzdálenost reproduktoru k vrchní hraně a bočním hranám byla stejná. Na zadní straně ozvučnice bude opět upevněn mezikus pro uchycení ozvučnice do stativu.

Dle teoretických předpokladů bude výsledná kmitočtová charakteristika ovlivněna difrakcemi vznikajícími na hranách. Kmitočtům, na kterých budou vznikat největší zvlnění v průběhu kmitočtové charakteristiky, bude odpovídat vlnová délka, jejíž hodnota je shodná s průměrnou vzdáleností reproduktoru od hrany ozvučnice. Vzdálenost v ose reproduktoru je k vrchní hraně a bočním hranám od reproduktoru 6,5 cm a ke spodní hraně 23,5 cm.

6.3.4 Symetrická obdélníková ozvučnice s přesahy

Na rozdíl od předchozích ozvučnic, zde již budou použity bočnice a bude se jednat o typ polouzavřené ozvučnice (obr.6.8). Přední deska této ozvučnice bude vycházet z rozměrů ozvučnice z předchozí kapitoly, kdy jediným rozdílem bude, že u otvoru



Obr. 6.7: Obdélníková ozvučnice s reproduktorem mimo střed

pro modul reproduktoru bude provedené i vyfrézování, aby konstrukce reproduktoru byla v rovině přední strany desky a nevyčnívala, tak jak tomu bylo u předešlých ozvučnic. K přední desce jsou již připojeny boky, tak aby celková hloubka ozvučnice byla 15 cm a tím došlo k zamezení vzniku nežádoucích difrakcí na zadních hranách ozvučnice. Hrany přední desky ozvučnice budou zaoblené s rádiusem 18 mm a tím bude dosaženo zamezení vzniků difrakcí na hranách. Připevnění ke stativu bude zajišťovat stejný mezikus jako u předchozích případů.



Obr. 6.8: Symetrická obdélníková ozvučnice s přesahy

Zaoblením předních hran a přidáním bočnic dojde k většinovému zamezení vzniku difrakcí, které u předchozí varianty budou značně ovlivňovat výslednou kmitočtovou charakteristiku soustavy. I přes zaoblení hran, ale může docházet k vzniku slabých difrakcí na některých kmitočtech kvůli nedostatečnému zaoblení.

6.3.5 Nesymetrická obdélníková ozvučnice s přesahy

Tato ozvučnice (obr.6.9) bude svou konstrukcí vycházet z konstrukce ozvučnice uvedené v předešlé kapitole, ovšem s jediným rozdílem, a to umístěním otvoru pro modul výškového reproduktoru. Otvor bude umístěn tak, aby žádná ze vzdáleností hran od reproduktoru nebyla soudělná. Tím dosáhneme toho, že pokud zaoblení hran

bude nedostatečné a i tak na nich budou vznikat slabé difrakce, nebudou difrakce ovlivňovat výslednou kmitočtovou charakteristiku na jednom konkrétním kmitočtu a její průběh bude vyrovnanější.

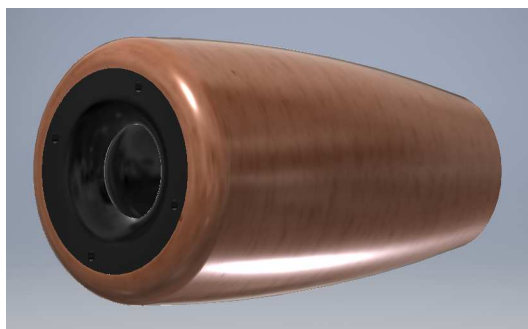


Obr. 6.9: Nesymetrická obdélníková ozvučnice s přesahy

6.3.6 Ozvučnice typu kapky

Poslední ozvučnicí pro měření difrakcí bude ozvučnice tvaru kapky (obr.6.10). Tvar této ozvučnice je kombinací kulové ozvučnice a tvarů ozvučnic, které jsou používány pro komerční účely. Tvar ozvučnice je tvořen tak, aby na celém jeho povrchu nebyla ostrá hrana a nedocházelo tak k nežádoucím difrakcím. V přední části ozvučnice je natrvalo zasazen stejný typ výškového reproduktoru, který je použit ve výměnném modulu pro ostatní ozvučnice. Přední hrany ozvučnice jsou zaobleny rádiusem 10 mm. Tento rádius je shodný s rádiusem zvukovodu výškového reproduktoru a dochází tak tedy k plynulému přechodu vlnění po ozvučnici bez vzniku difrakcí. Ideální tvar kapkové ozvučnice by se měl dozadu postupně zužovat, ale protože by nebylo možné tento tvar uchytnit ke stativu je ozvučnice zakončena rovnou plochou, na kterou bude připevněn mezikus pro uchycení do stativu.

Díky plynulým přechodům ozvučnice nebude na jejím povrchu docházet k žádným difrakcím a výsledná kmitočtová charakteristika soustavy bude mít vyrovnaný



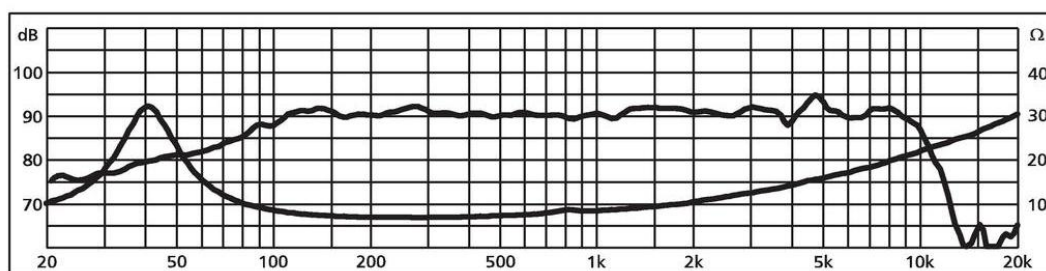
Obr. 6.10: Ozvučnice tvaru kapky

průběh, který bude záviset již pouze na vlastnostech použitého reproduktoru. Jedná se tedy o jedno z nejlepších provedení ozvučnice, které eliminuje vliv difrakcí.

7 Návrh dvoupásmových ozvučnic

V druhé sadě přípravků budou mít přípravky konstrukci ve formě dvoupásmové ozvučnice a bude se na nich měřit eliminace difrakcí a vliv změny vzájemných poloh reproduktorů v ozvučnici. Pro měření budou zhotoveny tři uzavřené ozvučnice. První z ozvučnic bude klasického obdélníkového půdorysu, druhá ozvučnice bude mít zkosené přední hrany kvůli eliminaci difrakcí, a třetí ozvučnice bude mít možnost měnit vzájemnou vzdálenost vyzařovacích bodů reproduktorů. Postupným měřením těchto přípravků bude student schopen vidět rozdíl mezi ozvučnicí, jejichž konstrukce neřeší vznik difrakcí na hranách, a ozvučnicí zhotovenou tak, aby na jejích hranách nevznikaly difrakce.

Jako reproduktory, kterými budou ozvučnice osazeny, jsem vybral vysokotónový reproduktor Monacor DT-25N a středobasový reproduktor Monacor SPH-170. Reprodukter Monacor DT-25N jsem použil již při měření difrakcí na ozvučnici a jeho kmitočtová charakteristika, udávaná výrobcem, je vidět na obr.6.1. V kombinaci s reproduktorem Monacor SPH-170, jehož kmitočtová charakteristika je zobrazena na obr.7.1, dosáhneme pokrytí celého kmitočtového pásma.



Obr. 7.1: Frekvenční charakteristika středobasového reproduktoru Monacor SPH-170

Dělicí kmitočet reproduktorů f_d bude udáván laditelnou kmitočtovou výhybkou zhotovenou v jiném semestrálním projektu. Kmitočtová výhybka bude moci přepínat dělicí kmitočet na hodnoty 1800 Hz, 2068 Hz, 2375 Hz, 2728 Hz, 3134 Hz a 3600 Hz. Protože z hodnoty dělicího kmitočtu vycházíme při výpočtu vzájemné vzdálenosti reproduktorů, byla tato vzdálenost vypočítaná dle vzorce pro všechny uvedené hodnoty dělicích kmitočtů. Tyto vzdálenosti jsou uvedeny v tab.7.1. Pro první dvě provedení ozvučnic bude vzájemná vzdálenost os reproduktorů 15,5 cm. Tato vzdálenost odpovídá dělicímu kmitočtu 2728 Hz a vybral jsem jí z toho důvodu, že tento kmitočet je svojí hodnotou uprostřed dělicích kmitočtů nastavitelných výhybkou.

f_{dv}	[kHz]	1,8	2,068	2,375	2,728	3,134	3,6
λ	[m]	0,188	0,164	0,143	0,125	0,108	0,094
$\frac{1}{4}\lambda$	[m]	0,047	0,041	0,036	0,031	0,027	0,024
$\frac{5}{4}\lambda$	[m]	0,236	0,206	0,179	0,156	0,136	0,118

Tab. 7.1: Vzdálenosti mezi reproduktory

7.1 Měření reálných vlastností reproduktorů

V této kapitole čerpám teoretické poznatky z literatury [7] [9].

Pro přesný návrh a optimalizaci reproduktorové ozvučnice je zapotřebí při návrhu zohlednit reálné vlastnosti použitých reproduktorů. Parametry udávané výrobcem se často neshodují s reálnými parametry pořízených reproduktorů. Pokud bych při návrhu vycházel z parametrů udávaných výrobcem, mohlo by dojít k chybnému návrhu ozvučnice a její následné neefektivní činnosti.

Základními parametry středobasových reproduktorů pro návrh ozvučnice jsou kmitočtové charakteristiky a Thiele-Smallovy parametry, ze kterých provádím výpočet objemu ozvučnice. Pro zjištění hodnot Thiele-Smallových parametrů je zapotřebí změřit jejich impedanční a fázové charakteristiky, ze kterých lze odečíst potřebné údaje k jejich výpočtu.

7.1.1 Měření impedančních charakteristik

K měření průběhů impedančních a fázových charakteristik všech tří použitých reproduktorů Monacor SPH-170 jsem použil metodu měření napětí a proudu protékajícího reproduktorem. Protékající proud byl měřen jako napětí na normálovém rezistoru s nízkou hodnotou odporu, který byl připojen sériově k měřenému reproduktoru. Automatické měření charakteristik bylo obstaráno elektroakustickým analyzátozem s generátorem NTi AudioRT-2B ovládaného programem RTEVAL, na jehož vstupy byla přivedena napětí na reproduktoru a normálovém rezistoru.

Charakteristiky reproduktorů byly prvně měřeny bez ozvučnice ve volném prostředí na antivibrační podložce. Z naměřených průběhů (obr.C.3) a (C.4) je zřejmé, že jednotlivé reproduktory mají mírně rozdílné vlastnosti. Tyto rozdíly můžeme pro naše účely zanedbat a bez větších problémů je během měření srovnávat. Proto byl dále měřen jen jeden z reproduktorů, který byl namontován do ozvučnice s vnitřním objemem 21,1 l a byla změřena jeho impedanční a fázová charakteristika v ozvučnici (obr.C.1) a (C.2), a dále pro lepší představu jeho funkčnosti v ozvučnici i jeho kmitočtová charakteristika (obr.??)

7.1.2 Výpočet Thiele-Smallových parametrů

Thiele-Smallovy parametry definují elektromechanické parametry reproduktorů, a dále také nízkofrekvenční chování elektroakustických měničů v oblasti rezonančního kmitočtu. Za použití Thiele-Smallových parametrů můžeme provádět simulace a výpočet parametrů navrhované ozvučnice.

Z naměřených impedančních charakteristik reproduktorů lze určit tyto parametry: maximální impedanci za rezonance Z_{max} , stejnosměrný odpor R_v a impedanci na kmitočtech f_1 a f_2 , které odpovídají poklesu elektrické impedance na hodnotu [7]

$$R_1 = R_v \sqrt{R_0}, \quad (7.1)$$

kde $R_0 = \frac{Z_{max}}{R_v}$. Z těchto odečtených parametrů jsem vypočítal hodnoty elektrického činitele jakosti Q_{Es} , mechanického činitele jakosti Q_{Ms} a celkového činitele jakosti Q_s . Tyto parametry určíme z rovnic [7]

$$Q_{Es} = \frac{Q_{Ms}}{R_0 - 1}, \quad (7.2)$$

$$Q_{Ms} = \frac{\sqrt{R_0}}{f_1 - f_2}, \quad (7.3)$$

$$Q_s = \frac{Q_{Es} Q_{Ms}}{Q_{Es} + Q_{Ms}}. \quad (7.4)$$

Dále lze vypočítat indukčnost cívky reproduktoru L_v :

$$L_v = \frac{\sqrt{Z_0^2 - R_v^2}}{2\pi f_0}, \quad (7.5)$$

kde Z_0 je impedance měniče na kmitočtu f_0 , přičemž kmitočet f_0 se musí co nejvíce blížit hodnotě 1 kHz.

V tabulce 7.2 jsou porovnány naměřené Thiele-Smallovy parametry (dále už jen TS parametry) všech tří středotónových reproduktorů Monacor SPH-170 s parametry udávanými výrobcem. Dále jsou v tabulce dopočítané TS parametry pro reproduktor č. 1, který byl vsazen do uzavřené ozvučnice o vnitřním objemu $V_b = 21,1$ litrů a z nichž lze vypočítat přesný ekvivalentní objem $V_{as} = 26,77$ litrů dle vzorce [7]

$$\frac{Q_c}{Q_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}, \quad (7.6)$$

kde Q_c je celkový činitel jakosti reproduktoru po jeho vsazení do ozvučnice, Q_s je celkový celkový činitel jakosti samotného reproduktoru a V_b objem použité ozvučnice.

	Parametry výrobce	Repro 1	Repro 1 v OZV	Repro 2	Repro 3	Jednotka
R_v	6,2	6,6	6,6	6,9	6,4	Ω
Z_{max}	-	25	27	25	25	Ω
R_0	-	3,7879	4,0909	2,6232	3,9063	Ω
R_1	-	12,845	13,349	13,134	12,649	Ω
f_r	38	46	64	46	46	Hz
f_1	-	29	46	30	29	Hz
f_2	-	74	86	74	74	Hz
Q_{Ms}	2,38	1,9895	3,2362	1,99	2,0203	-
Q_{Es}	0,55	0,7136	1,047	0,7586	0,6952	-
Q_s	0,44	0,5252	0,7911	0,5492	0,5172	-
f_0	-	1012	1012	1012	1012	Hz
Z_0	-	5,69	8,77	9,43	8,67	Ω
L_v	0,00045	0,0009	0,0009	0,001	0,0009	H
V_{as}	37	26.77	-	-	-	l

Tab. 7.2: Thiele-Smallovy parametry použitých reproduktorů Monacor SPH-170

7.2 Návrh typu a objemu ozvučnice

7.3 Návrh základní ozvučnice

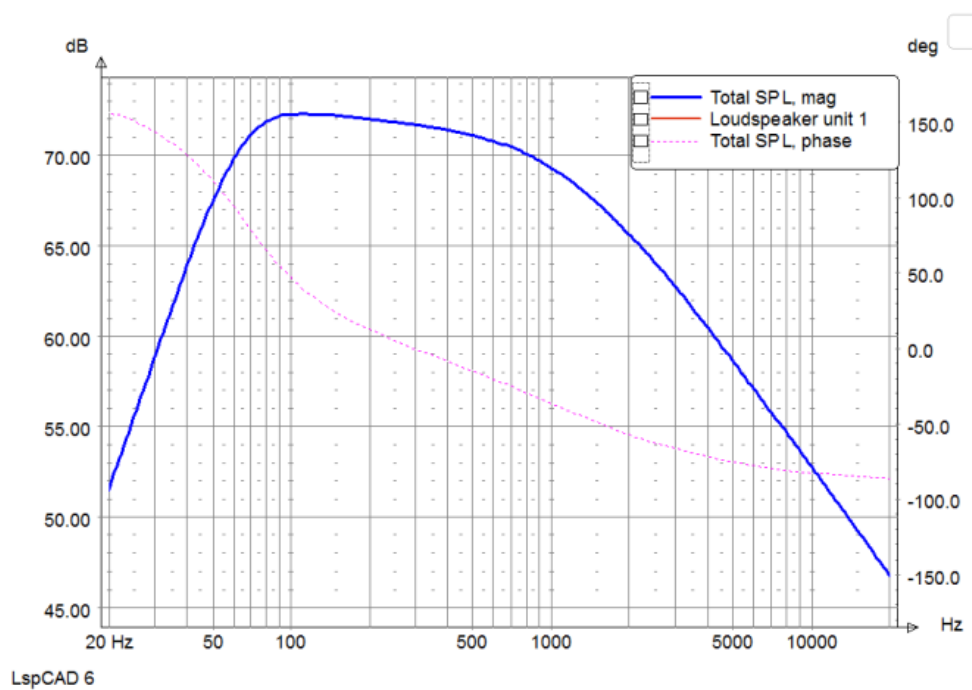
První ozvučnicí, na které se bude měřit vliv difrakcí na kmitočtovou charakteristiku, bude standardní uzavřená kvádřová konstrukce s vnějšími rozměry $25 \times 35 \times 35$ cm ($\check{S} \times V \times H$) a vnitřním objemem 21 litrů (obr.7.2) zhotovená z materiálu MDF o tloušťce 18 mm. Reprodukory nebudou zapuštěny a jejich vzájemná vzdálenost akustických os bude 15,5 cm viz. tab.7.1.

Pro zjištění správné funkčnosti ozvučnice jsem provedl simulaci v programu Lsp-Cad. Z průběhu simulace (obr.7.3) je vidět, že ozvučnice bude reproduktoru dovolovat reprodukovat kmitočty již od 55 Hz, který je pro naše účely dostačující.

Tato ozvučnice bude představovat variantu, kdy při navrhování nebudou brány v potaz znalosti vzniku difrakcí na hranách ozvučnice. Difrakce budou vznikat jak na hranách ozvučnice, tak i na hranách reproduktorů, které pro tento případ nejsou zapuštěny a vyčnívají nad přední desku ozvučnice, a ovlivní tak výslednou kmitočtovou charakteristiku soustavy. Vznik difrakcí se uplatní zejména na kmitočtech s vlnovou délkou rovnou vzdálenosti výškového reproduktoru od hran ozvučnice. Vzdálenost výškového reproduktoru od hran v osách reproduktoru činí 12,5 cm k bočním hranám a 7 cm k hraně nad reproduktorem. Těmito vzdálenostem odpovídají kmitočty



Obr. 7.2: Základní dvoupásmová ozvučnice



Obr. 7.3: Simulace ozvučnice o objemu 21 litrů

2672 Hz a 4771 Hz, na jejichž násobcích by průběh kmitočtové charakteristiky měl být zvlněn.

7.4 Návrh ozvučnice se zkosenými hranami

Další ozvučnicí bude ozvučnice se zkosenými předními hranami, kde je již řešen problém vzniku difrakcí (obr.7.4). Rozměry ozvučnice budou takřka stejné jako v předchozím případě, aby z naměřených kmitočtových charakteristik byl vidět rozdíl jejich průběhu a vliv difrakcí na hranách ozvučnice. Vzdálenost akustických os reproduktorů, vzdálenost reproduktorů od hran a vnitřní objem ozvučnice bude shodný s ozvučnicí v předchozím případě. Kvůli zkosení hran o hloubce 36 mm na přední desce bude přední deska muset být vyrobena z MDF desky tloušťky 36 mm a ostatní části ozvučnice budou vyrobeny z MDF desky tloušťky 18 mm. Vnější rozměry se tedy změní na $25 \times 35 \times 36,8$ cm (Š \times V \times H).



Obr. 7.4: Ozvučnice se zkosenými hranami

Ozvučnice bude představovat variantu, kde při jejím návrhu beru v úvahu vznik difrakcí na hranách ozvučnice. Díky zkosení hran, zmenšení plochy přední části ozvučnice a zapuštění reproduktorů do roviny s ozvučnicí bude vliv difrakcí eliminován.

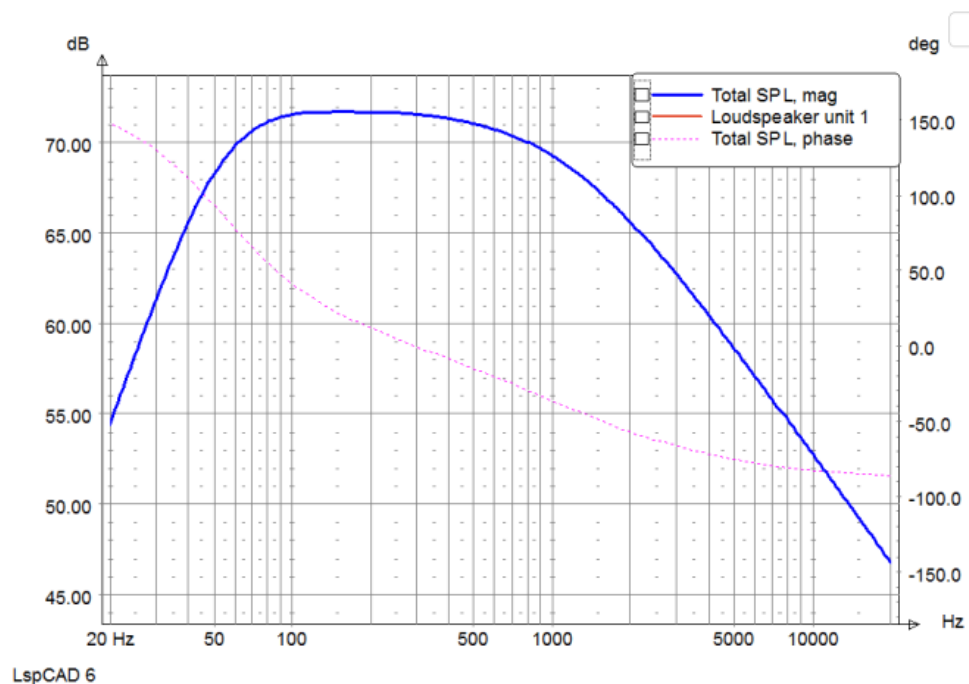
7.5 Návrh ozvučnice s variabilní polohou výškového reproduktoru

Poslední ozvučnicí bude ozvučnice, u které budeme moci měnit polohu výškového reproduktoru vůči středobasovému (obr.7.5) Konstrukce ozvučnice bude vycházet z tvaru uvedeného v kapitole 2.9, kdy ozvučnice bude rozdělaná na spodní část, víko a modul výškového reproduktoru s celkovým vnitřním objemem 46 l a vnějšími rozměry ozvučnice $40 \times 54 \times 30$ cm (Š \times V \times H). Boční hrany společně s vrchní hranou budou zkoseny pod úhlem 45° s hloubkou zkosení 10 cm. Ve spodní části ozvučnice bude umístěn středobasový reproduktor. Modul výškového reproduktoru je tvaru válcové ozvučnice, jejíž hrany jsou zaobleny kvůli vzniku difrakcí. Ve víku bude otvor pro umístění modulu výškového reproduktoru, uvnitř kterého bude možnost modul posouvat dopředu a dozadu a měnit tím vzdálenost vyzařovacích bodů reproduktorů.



Obr. 7.5: Ozvučnice s variabilní polohou výškového reproduktoru

Z průběhu simulace (obr.7.6) je vidět, že díky zvětšením vnitřního objemu ozvučnice na 46 litrů dovolí ozvučnice reproduktoru správně reprodukovat signál již od 50 Hz. Tím se tedy dostaneme o 5 Hz níž než u předešlých ozvučnic. Pro naše účely by byl dostačující i vnitřní objem 21 litrů, ale nebyly by tak dodrženy poměry jednotlivých stran dle teoretických předpokladů z kapitoly 2.9.



Obr. 7.6: Simulace ozvučnice o objemu 46 litrů

Tato ozvučnice bude sloužit k ověření teoretických předpokladů uvedených v kapitole 3, kdy posunem modulu výškového reproduktoru budeme měnit vzájemnou vzdálenost vyzařovacích bodů reproduktorů. V ozvučnici bude možné zatím měnit vzdálenost, která závisí na zapuštění reproduktorů. Po provedení testovacích měření budou dodatečně navržena víka, která když vyměníme, získáme jinou vzájemnou vzdálenost středů reproduktorů. Víka budou navržena tak, aby vzdálenosti mezi reproduktory vycházely z tab.7.1.

8 Realizace modulů

V této kapitole je popsán postup při konstrukci jednotlivých modulů dle návrhu uvedených v kapitolách 6 a 7. Dále jsou zde zveřejněné výsledky měření kmitočtových a směrových charakteristik jednotlivých modulů.

V tabulce 8.1 je uvedený kompletní soupis materiálu, který byl potřebný k zhotovení a dokončení modulů kromě laků, MDF desek a spojovacího materiálu.

Položka	Typ	Počet kusů
Středobasový reproduktor	Monacor SPH-170	3
Výškový reproduktor	Monacor DT-25N	5
Bassreflexový nátrubek	Monacor MBR-50	1
Nožky	Adam Hall 4904	20
Bednový uzávěr	Bednový uzávěr 60×16	6
Ochranné rohy	MZF-8507	60
Mezikus na uchycení	Noha ke skříňce	6
Konektorová miska	ST-945GM	1
Potahová tkanina	CC-140V/SW	1
Speakon konektor samice	Neutrik NL4MPR	2
Speakon konektor samec	Neutrik NL4FX	2
Kabel dvojlinka 2×1,5	CYH 2×1,5	10 metrů
Kabel dvojlinka 2×2,5	CYH 2×2,5	10 metrů
Hi-Fi kabel 4×2,5	Elephant SPM425	8 metrů

Tab. 8.1: Soupis potřebného materiálu

Jednotlivé moduly byly zhotoveny dle výkresové dokumentace, která je uvedena v příloze práce. Moduly byly vyrobeny z 18mm MDF desky, slepeny lepidlem na tupo a bez dodatečného jištění spoje pomocí kolíků nebo šroubů. Následně jsem provedl zábrus spojů a tmelení spojů na potřebných místech a nanasl vrstvu černého matného akrylátového laku. Následovalo broušení a nanášení dalších vrstev laku, dokud nebylo docíleno hladkého povrchu, a poté byl proveden nástřik finální vrstvy bezbarvého dvojsložkového laku COLOMIX.

Po dokončení modulů ozvučnic bylo provedeno měření kmitočtových a směrových charakteristik jednotlivých ozvučnic a ověřen vznik difrakcí a jejich vliv na průběh kmitočtové charakteristiky. Pro měření byl před reproduktor předřazen kondenzátor 9,9 μF , který slouží jako horní propust pro ochranu reproduktoru před nechtěným signálem. To má za důsledkem, že pod 1,6 kHz je kmitočtová charakteristika neobjektivní, ale vliv difrakcí na kmitočtovou charakteristiku je zde i tak patrný. K měření charakteristik samotných byl použit měřicí systém Pulse, který se

skládá z hardwaru LAN–XI obsahujícího mikrofonní vstupy a výstupy generátoru. Celý měřicí systém je připojen pomocí intranetu k ovládacímu softwaru LabShop, díky kterému šlo jednoduše změřit kmitočtové i směrové charakteristiky potřebné k určení funkčnosti jednotlivých modulů. Měření probíhalo v bezodrazové komoře a měřicí mikrofón byl umístěn ve vzdálenosti 1 metru od ozvučnice.

8.1 Moduly výškového reproduktoru

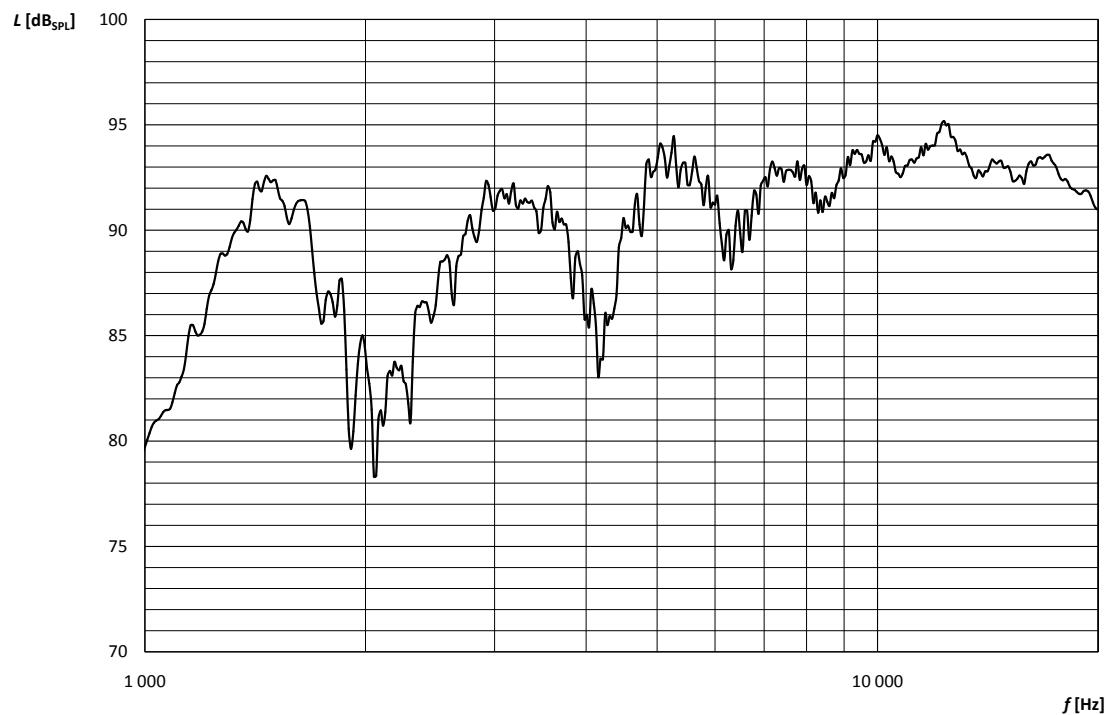
Pro moduly, které využívají pouze výškový reproduktor DT-25N, je reproduktor vsazen a zalepen do PVC trubky o délce 10 cm a průměru 50 mm. Tím je docíleno snadné výměny reproduktoru mezi jednotlivými moduly ozvučnic bez použití spojovacího materiálu. Do každého otvoru pro umístění reproduktoru je vlepena plastová vložka vyrobená z bassreflexového nátrubku Monacor MBR-50, která zabraňuje mechanickému poškození při vsouvání a vysouvání reproduktoru. Ze zadní strany ozvučnic modulu je připevněn mezikus, který slouží k uchycení modulu do stojanu.

8.1.1 Kruhová ozvučnice

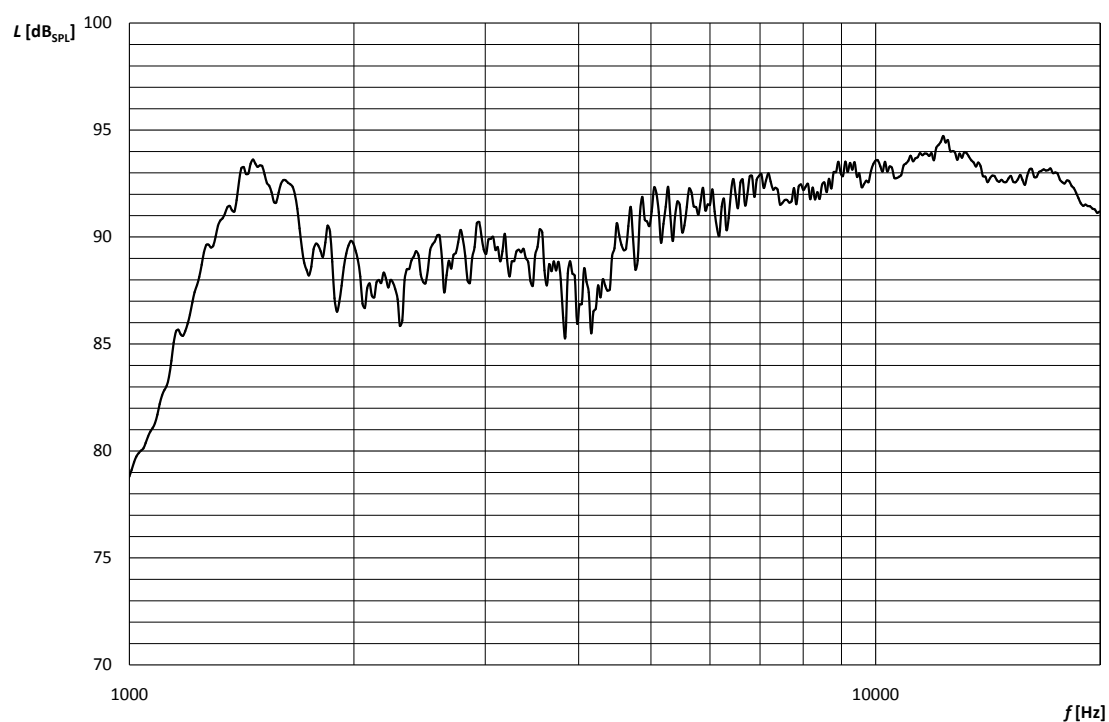
Z průběhu naměřené kmitočtové charakteristiky (obr.8.1) je vidět vznik hřebenového filtru způsobený difrakcemi na hranách ozvučnice. Maxima v kmitočtové charakteristice jsou na násobcích kmitočtu 1,6 kHz a minima na násobcích 2,1 kHz. Vlnová délka těchto kmitočtů odpovídá násobkům poloměru ozvučnice a potvrzují se tak tedy teoretické předpoklady o silném vlivu difrakcí díky stejné vzdálenosti hrany ozvučnice od reproduktoru po celém obvodu ozvučnice.

8.1.2 Obdélníková ozvučnice s reproduktorem ve středu

Na průběhu kmitočtové charakteristiky (obr.8.2) výškového reproduktoru umístěného do této ozvučnice je vidět propad, který začíná od kmitočtu 1,5 kHz a končí kolem 6 kHz, a zároveň zvlnění celého průběhu kmitočtové charakteristiky. Tím, že je reproduktor umístěn v geometrickém středu ozvučnice, je vzdálenost reproduktoru k horní a spodní hraně ozvučnice stejná, a podobně je tomu tak i u vzdáleností bočních hran. Díky této konstrukci ovlivňují kmitočtovou charakteristiku dvě vzdálenosti hran. První vzdálenost je 15 cm, která odpovídá zvlnění charakteristiky s maximy a minimy na násobcích kmitočtů 2266 Hz a 1133 Hz po celém rozsahu kmitočtové charakteristiky. Druhá vzdálenost 6,5 cm odpovídá zvlnění kmitočtové charakteristiky na násobcích kmitočtu 5230 Hz a způsobuje již zmiňovaný propad od kmitočtu 1,5 kHz a končí kolem 6 kHz.



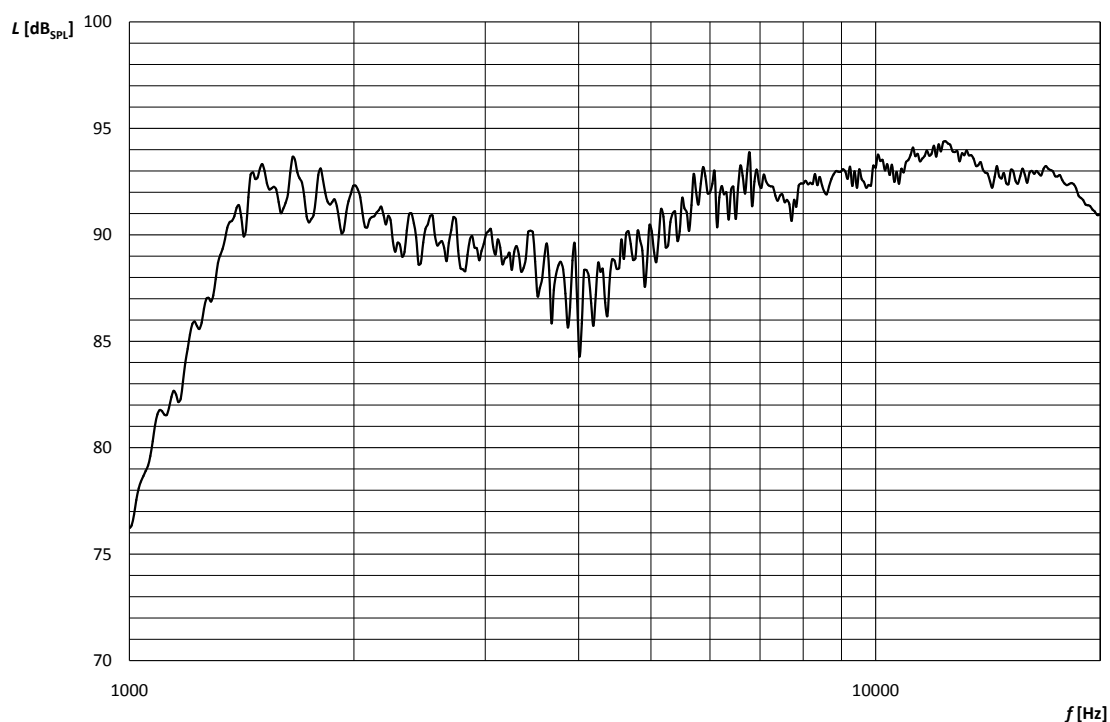
Obr. 8.1: Kmitočtová charakteristika modulu kruhové ozvučnice



Obr. 8.2: Kmitočtová charakteristika modulu obdélníkové ozvučnice s reproduktorem ve středu

8.1.3 Symetrická obdélníková ozvučnice

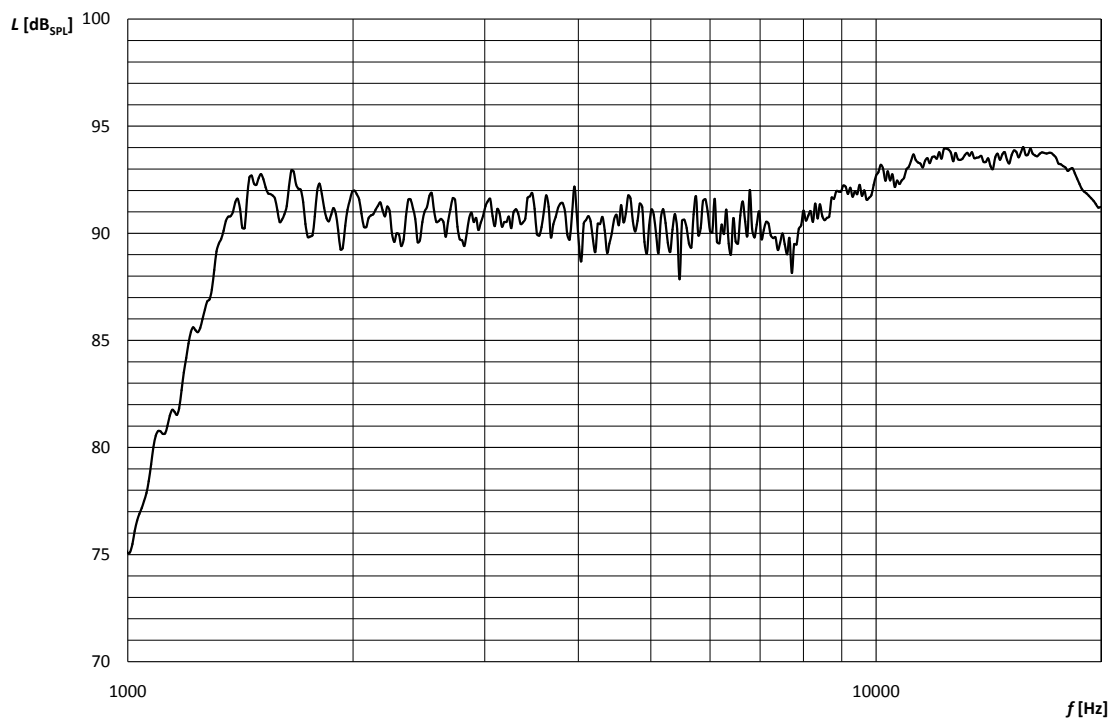
Umístění reproduktoru v této ozvučnici bylo zvoleno tak, aby vzdálenost reproduktoru k bočním hranám a vrchní hraně byla stejná, a to 6,5 cm. Vzdálenost ke spodní hraně je 23,5 cm. Díky tomu je na průběhu kmitočtové charakteristiky (obr.8.3) vidět propad s minimem na 4 kHz. Ve srovnání s předešlou ozvučnicí, která má reproduktor v geometrickém středu, se zde již nevyskytuje tak značné zvlnění v průběhu celé kmitočtové charakteristiky, až na již zmíněný propad na 4 kHz, který je u obou modulů totožný a vzniká díky absenci bočnic.



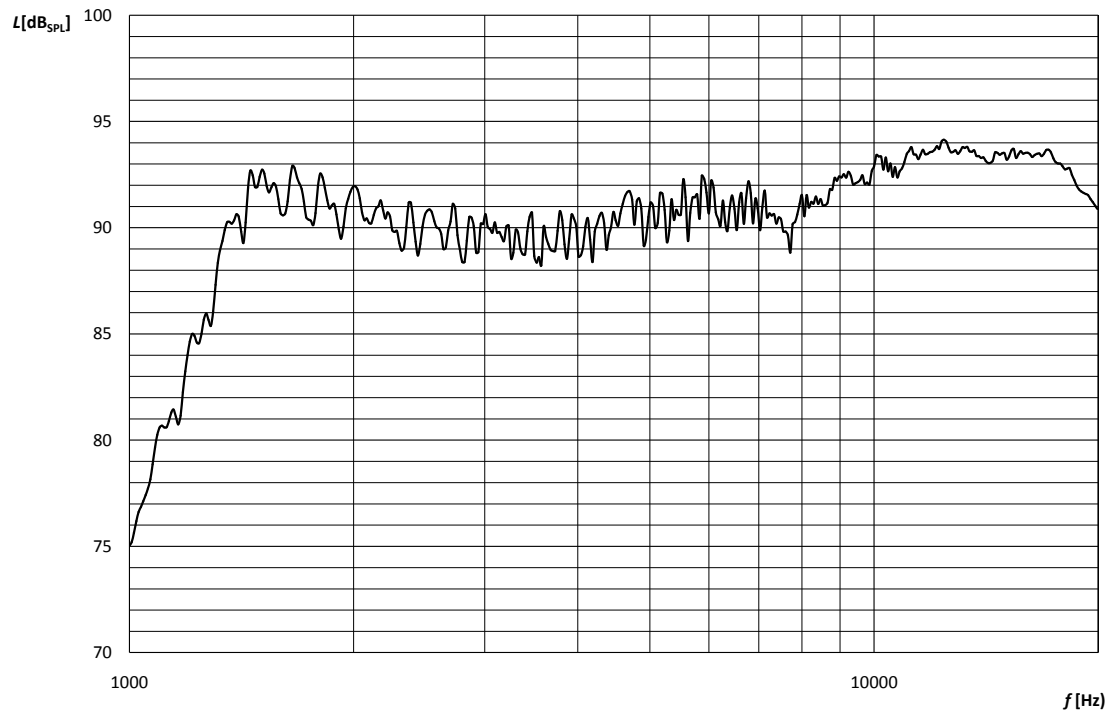
Obr. 8.3: Kmitočtová charakteristika modulu symetrické obdélníkové ozvučnice

8.1.4 Symetrická obdélníková ozvučnice s bočnicemi

Konstrukce ozvučnice vychází z předešlé symetrické obdélníkové ozvučnice, ke které jsou přidělány bočnice o hloubce 15 cm. Bočnice zamezí vzniku difrakcí na zadních hranách ozvučnice typu rovinné desky. Další úpravou ozvučnice je zaoblení předních hran o rádiu s poloměrem 18 mm. Tím je docíleno eliminace velké části vzniku difrakcí na předních hranách ozvučnice. Z průběhu kmitočtové charakteristiky zobrazené na obr.8.4 je patrné uplatnění vlivu bočnic, které eliminují propad kmitočtové charakteristiky na 4 kHz. Na průběhu charakteristiky zůstane již pouze mírný propad od 1,5 kHz do 10 kHz vzniklý díky zbylým difrakcím.



Obr. 8.4: Kmitočtová charakteristika modulu symetrické obdélníkové ozvučnice s bočnicemi



Obr. 8.5: Kmitočtová charakteristika modulu nesymetrické obdélníkové ozvučnice s bočnicemi

8.1.5 Nesymetrická obdélníková ozvučnice s bočnicemi

Nesymetrická obdélníková ozvučnice s bočnicemi vychází rozměry a konstrukcí ze symetrické ozvučnice s boky. Otvor pro umístění reproduktoru je zde ale umístěn tak, aby žádná jeho vzdálenost k hraně nebyla soudělná, tím je zamezeno umocňování vzniku difrakcí na určitých kmitočtech. Dalším rozdílem je povrchová úprava, kdy místo černého nástřiku je použita potahovací tkanina, která sama o sobě pomáhá k zamezení vzniku difrakcí na hranách. Na průběhu kmitočtové charakteristiky (obr.8.5) je ve srovnání s předešlou konstrukcí vidět větší propad v okolí kmitočtu 3,5 kHz.

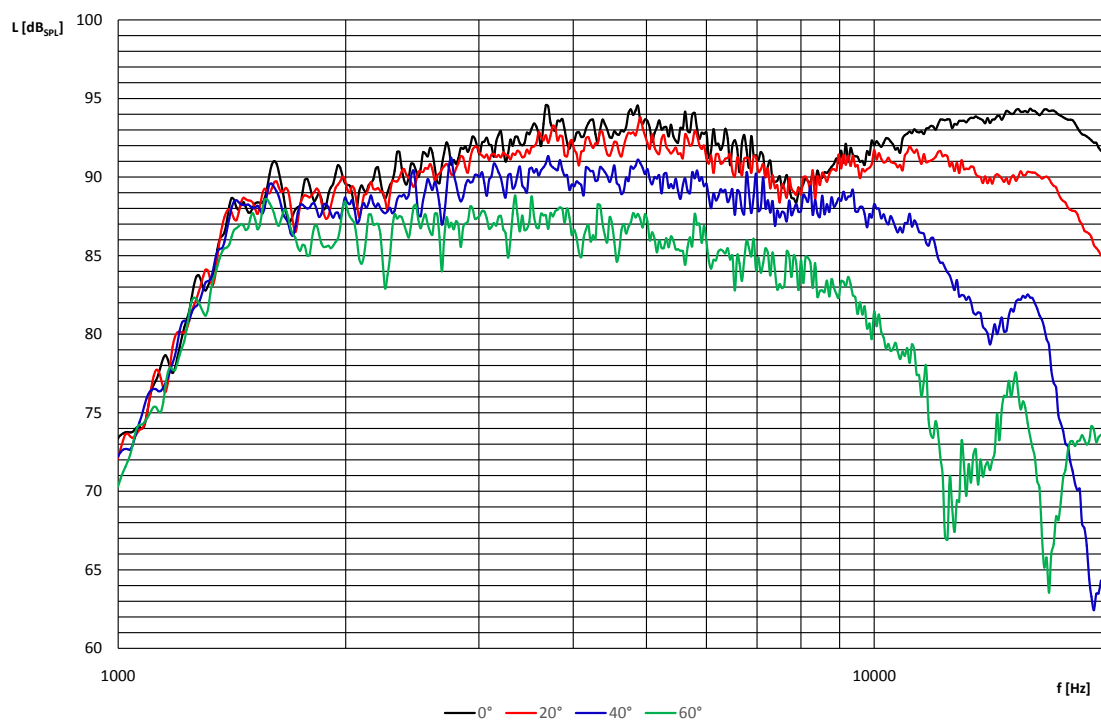
8.1.6 Ozvučnice typu kapky

Posledním přípravkem pro měření difrakcí na ozvučnici výškového reproduktoru je ozvučnice typu kapky. Tvar této ozvučnice vychází z poznatků nastudovaných v kapitole 2 a kombinací již stávajících řešení u komerčních výrobců.

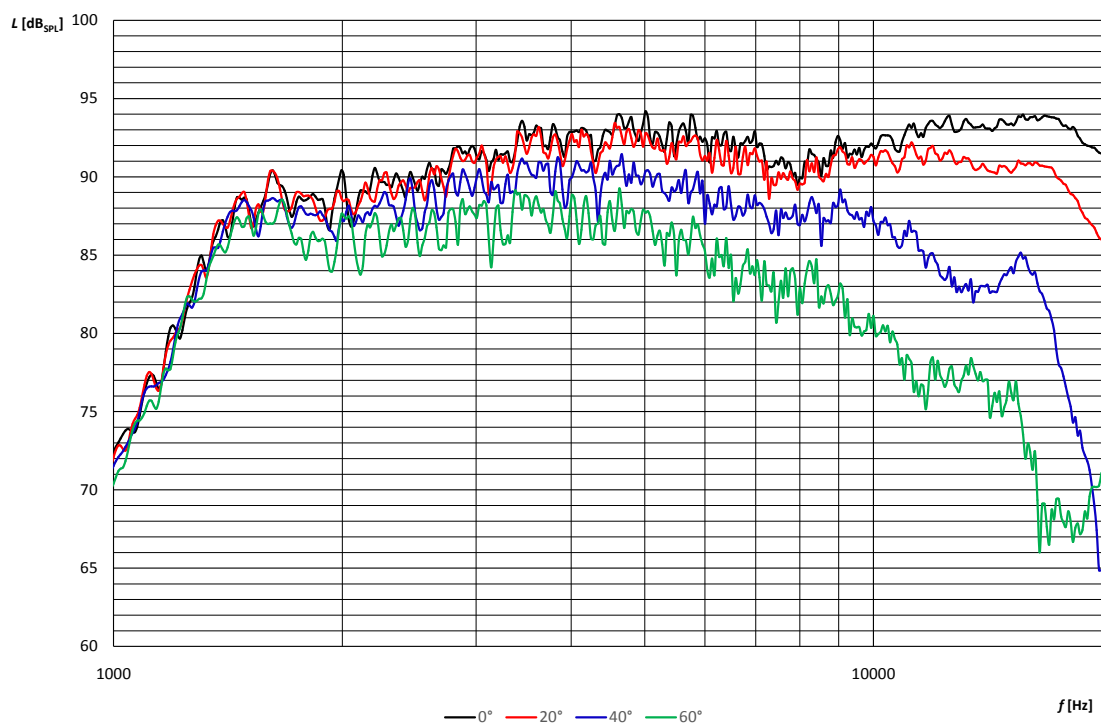
Modul kapky byl zkonstruován dle návrhu uvedeném v kapitole 6.3.6, ale po jeho zhotovení a změření kmitočtové charakteristiky jsem zjistil, že jeho funkčnost není úplně ideální. Z důvodu přesnějšího zjištění chování byly změřeny navíc kmitočtové charakteristiky mimo osu reproduktoru a to pod úhly 20° , 40° a 60° (obr.8.6). Z naměřených charakteristik je vidět, že konkrétně v ose reproduktoru je znatelný propad na 7,8 kHz. Vlnová délka frekvence 7,8 kHz odpovídá vlnové délce 4,4 cm a to odpovídá poloměru přední části modulu. Tento propad je tedy způsoben nedostatečným rádiusem přední hrany kapky.

Na náhradním modulu kapky byl experimentálně zvětšován rádius přední hrany, abych zjistil jak moc velký vliv má na výslednou kmitočtovou charakteristiku. Tím, že radius byl zvětšován ručně, a ne na stroji z důvodu nedostupnosti soustruhu, se jednalo pouze o testovací měření, ze kterého mohla být provedena optimalizace návrhu modulu kapky. Modifikovaný modul se ale již do odevzdání práce nestihl vyrobit.

Na obr.8.7 jsou vidět kmitočtové charakteristiky ručně upraveného modulu kapky s větším rádiusem. Na průběhu charakteristik je vidět menší propad na kmitočtu 7,8 kHz a zlepšení směrových vlastností, než bylo u původně navrženého modulu kapky. Se zvyšujícím se kmitočtem roste směrovost vyzařovaného akustického signálu a způsobuje zvlnění kmitočtových charakteristik na vyšších kmitočtech měřených zejména pod úhlem 60° .



Obr. 8.6: Kmitočtová charakteristika modulu typu kapky se základním rádiusem



Obr. 8.7: Kmitočtová charakteristika modulu typu kapky s upraveným rádiusem

8.2 Dvoupásmové ozvučnice

Pro osazení dvoupásmových ozvučnic jsou použity výškové reproduktory Monacor DT-25N a středotónové reproduktory Monacor SPH-170. Každá z ozvučnic je pevně osazena jedním párem těchto reproduktorů.

Na každou ozvučnici jsou namontovány nožky tak, aby mohla ležet nastojato i naležato a šlo tedy změřit jejich směrové charakteristiky jak v horizontální, tak ve vertikální rovině. Protože kmitočtová výhybka není součástí ozvučnice, bude k připojení vstupního signálu z externí výhybky sloužit 4pinový speakon konektor, kde každý z reproduktorů má svůj pár pinů. Zapojení jednotlivých pinů konektoru speakon je uvedeno v tab.8.2.

Pin	Reproduktor	Polarita
1 +	Středobasový	+
1 -	Středobasový	-
2 +	Výškový	+
2 -	Výškový	-

Tab. 8.2: Zapojení konektoru speakon v dvoupásmové ozvučnici

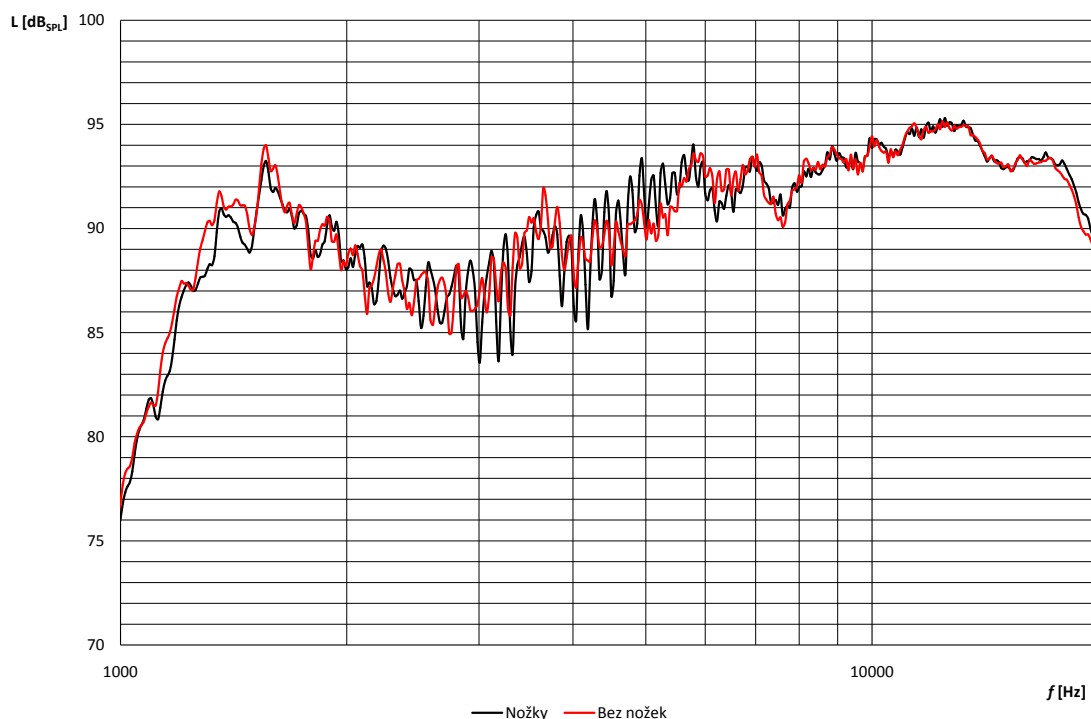
Kvůli absenci výhybky při měření jsou kmitočtové charakteristiky měřeny pro každý reproduktor samostatně. Z naměřených průběhů charakteristik lze tedy zjistit přesnou funkčnost samostatných reproduktorů a reagovat na ni při návrhu kmitočtové výhybky. Kmitočtové charakteristiky středobasového reproduktoru byly měřeny jak ve vzdálenosti 1 m, tak ve vzdálenosti 25 cm, díky tomu lze získat lepší představu o vlivu difrakcí a vlivu parazitních odrazů. Naměřené hodnoty pod 100 Hz nelze díky kritickému kmitočtu bezodrazové místnosti brát zcela vážně a proto jsou spíše orientační.

8.2.1 Základní dvoupásmová ozvučnice

Konstrukce základní dvoupásmové ozvučnice je provedena elementárním způsobem tak, aby zde nebyl vůbec řešen vliv difrakcí na výslednou kmitočtovou charakteristiku. Oba dva použité reproduktory nejsou zapuštěny a vyčnívají tak nad přední ozvučnici. Dále má přední strana ostré hrany, na kterých bude docházet ke vzniku difrakcí.

U ozvučnice je díky šestici uzávěrů možno oddělat zadní desku, a tím je umožněn přístup do vnitřku ozvučnice. Oddělávání zadní desky slouží k snadnému vyjmutí tlumicího rouna, které slouží k potlačení vlivu stojatého vlnění uvnitř ozvučnice. Díky tomu si student bude moci změřit vliv a důležitost tlumení stojatého vlnění na výsledný průběh kmitočtové charakteristiky.

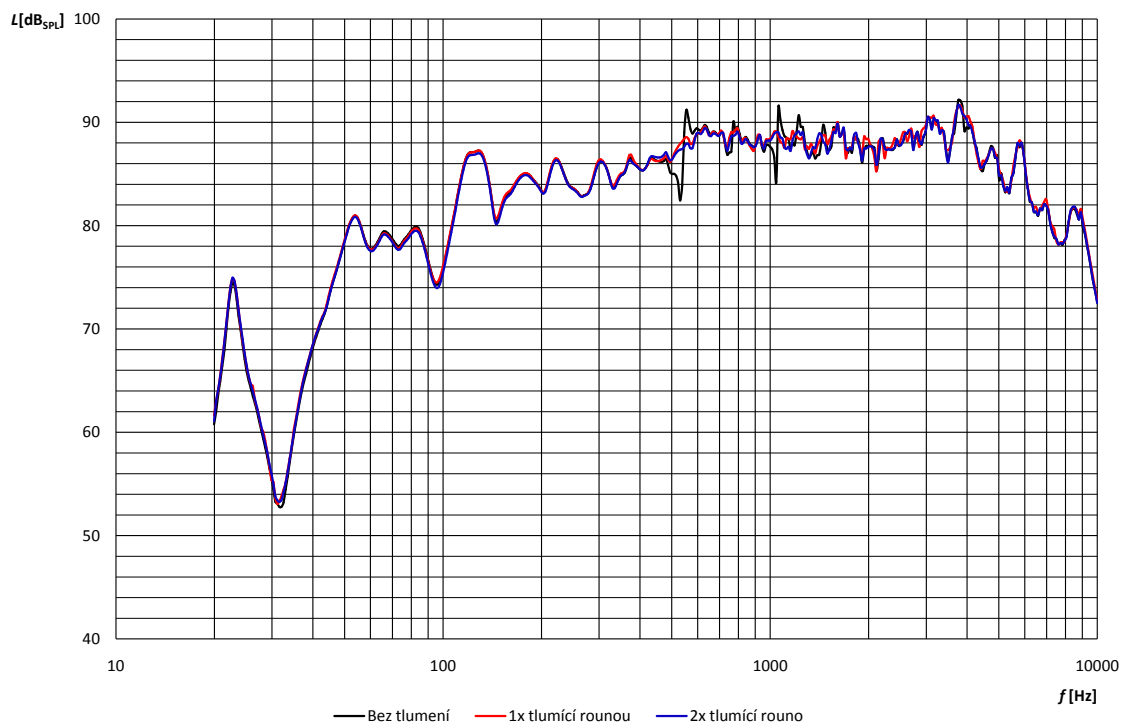
Na obr.8.8 je vidět průběh kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici. Kromě měření čisté přední ozvučnice bylo provedeno měření, kdy na přední straně ozvučnice byly přidělané nožky tak, aby ozvučnici bylo možné postavit na přední stranu pro snadné vkládání a vyndávání tlumicího rouna. Na naměřené charakteristice je zřetelně vidět vliv difrakcí vzniklých na nožkách vůči průběhu bez nožiček.



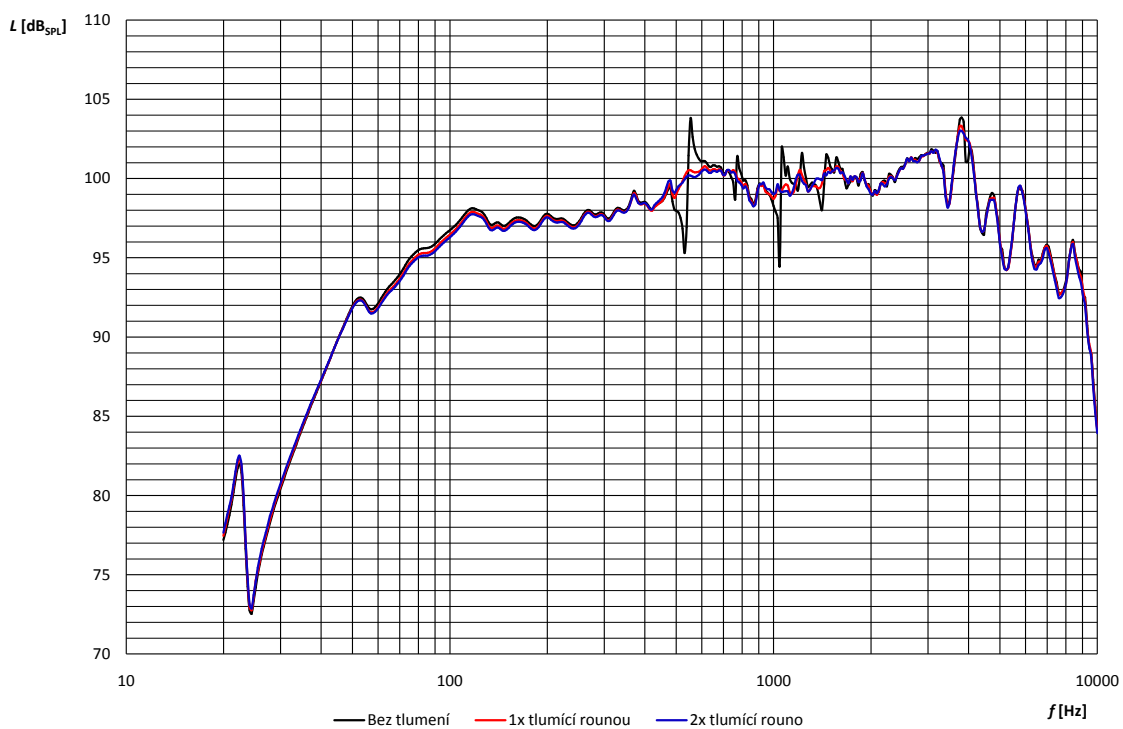
Obr. 8.8: Kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici

Z průběhu kmitočtových charakteristik středobasového reproduktoru ve vzdálenosti 1 m (obr.8.9) a ve vzdálenosti 25 cm (obr.8.10), je vidět jak vliv stojatého vlnění uvnitř ozvučnice, tak i vliv difrakcí. Vložením tlumicího rouna dosáhneme k utlumení stojatého vlnění vyrovnaním kmitočtové charakteristiky v pásmu od 400 Hz do 2000 Hz. Změnou vzdálenosti měřicího mikrofону od ozvučnice dosáhneme vyhlazení zvlnění průběhu kmitočtů do kmitočtu 3 kHz, které způsobují difrakce na hranách ozvučnice.

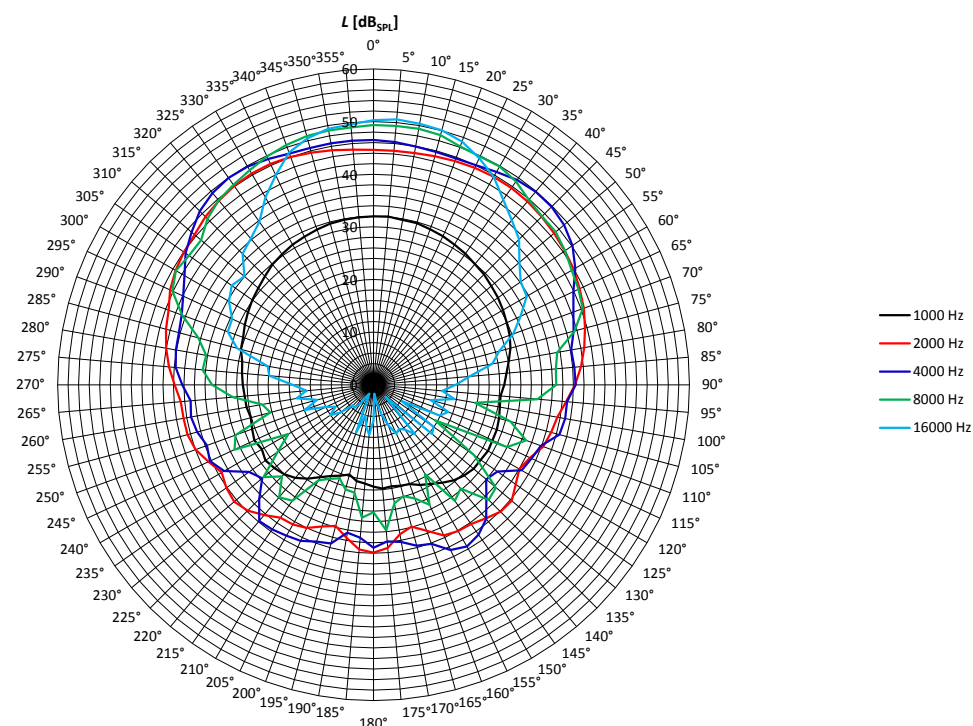
Pro výškový i středobasový reproduktor byly dále změřeny směrové charakteristiky jak v horizontální rovině (obr.8.11) a (obr.8.13), tak i ve vertikální rovině (obr.8.12) a (obr.8.14). Z průběhu směrových charakteristik výškového reproduktoru je vidět jeho dobrá směrovost pro všechny měřené kmitočty. Ze směrových charakteristik středobasového reproduktoru je vidět, že na vyšších kmitočtech již klesá jeho vyzařovací úhel.



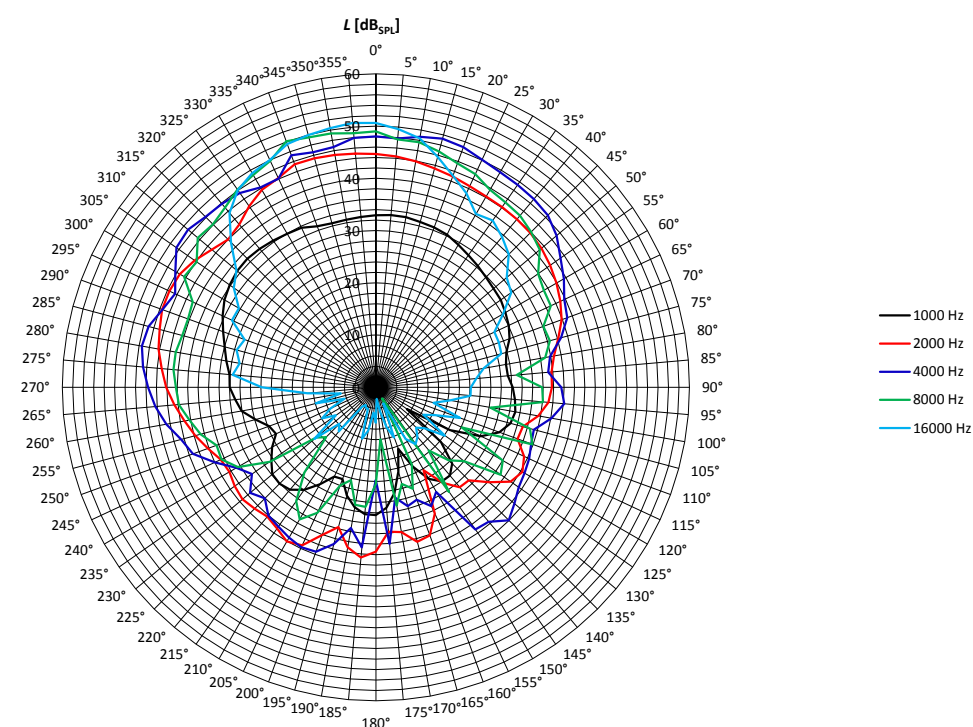
Obr. 8.9: Kmitočtové charakteristiky středobasového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici 1 m



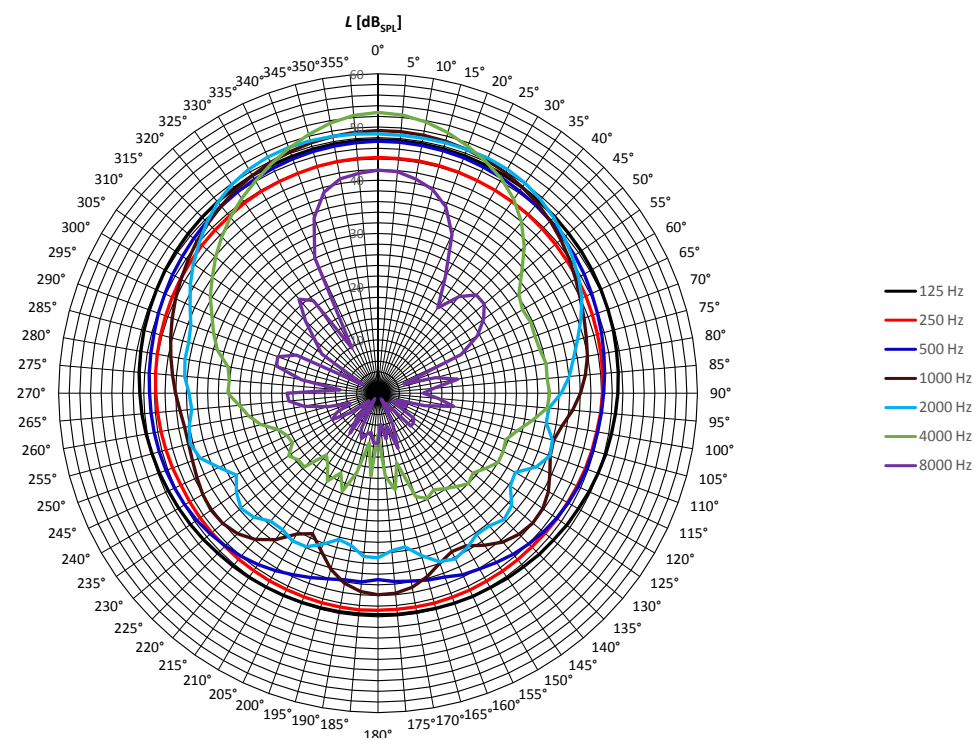
Obr. 8.10: Kmitočtové charakteristiky středobasového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici 25 cm



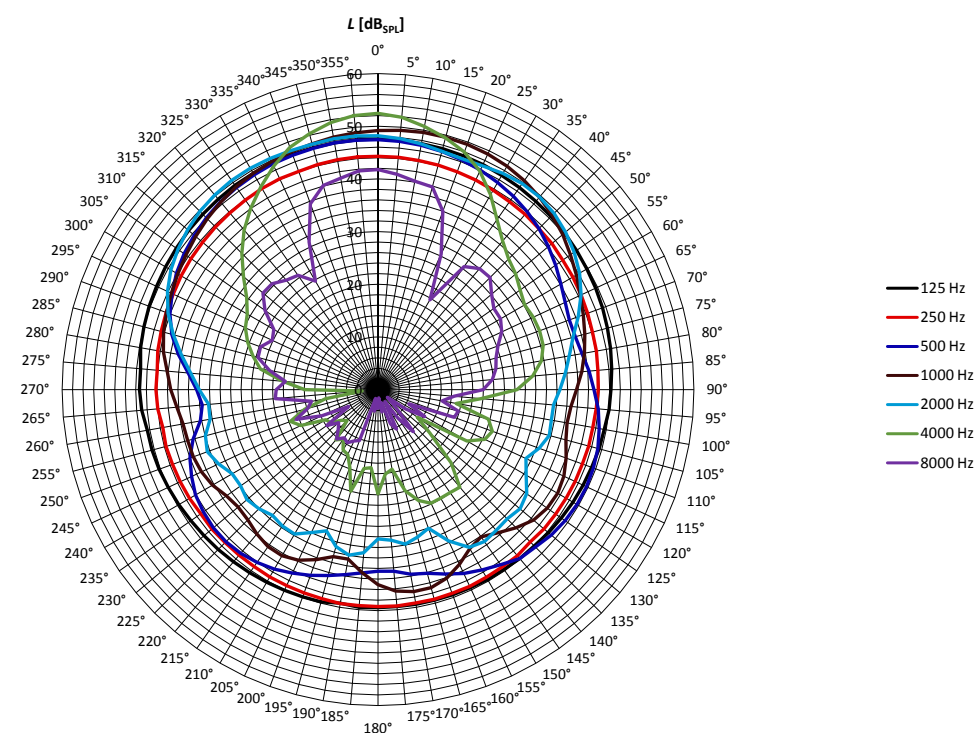
Obr. 8.11: Směrová charakteristika výškového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici – horizontální rovina



Obr. 8.12: Směrová charakteristika výškového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici – vertikální rovina



Obr. 8.13: Směrová charakteristika středobasového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici – horizontální rovina

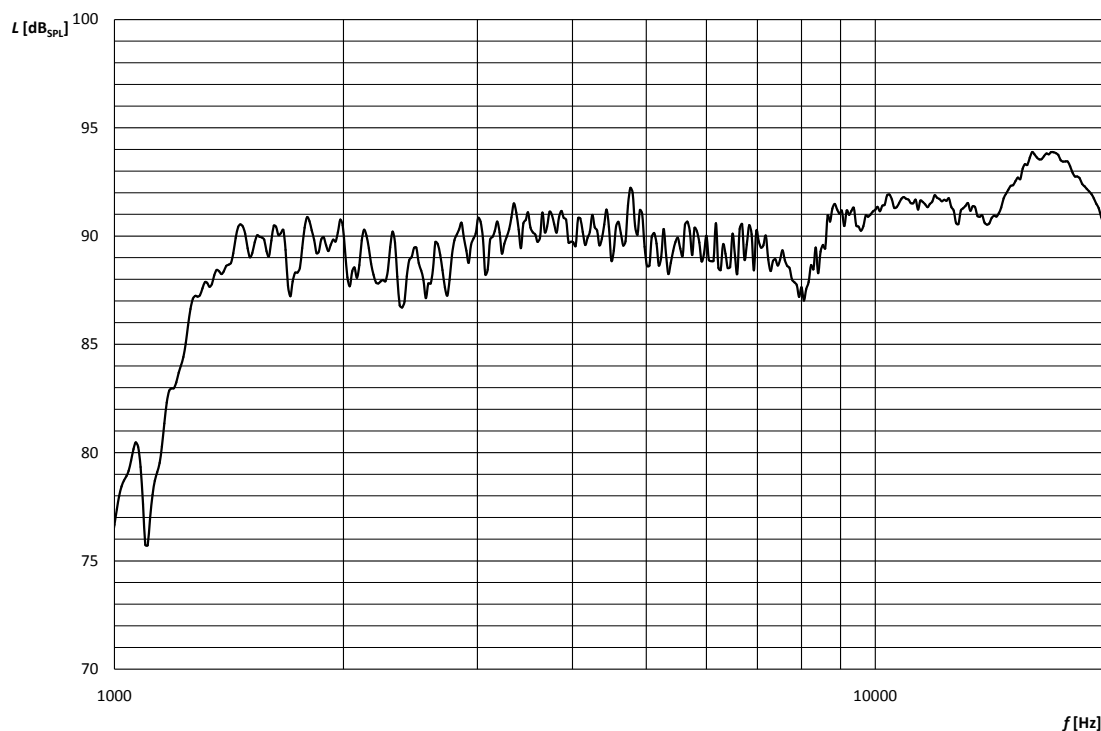


Obr. 8.14: Směrová charakteristika středobasového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici – vertikální rovina

8.2.2 Dvoupásmová ozvučnice se zaoblenými hranami

Konstrukce ozvučnice vychází ze základní ozvučnice, ale jsou zde již řešeny vznik difrakcí. Na přední desce ozvučnice jsou zkosené a zaoblené hrany, tak aby bylo docíleno k co nejmenší vzdálenosti hran od reproduktorů.

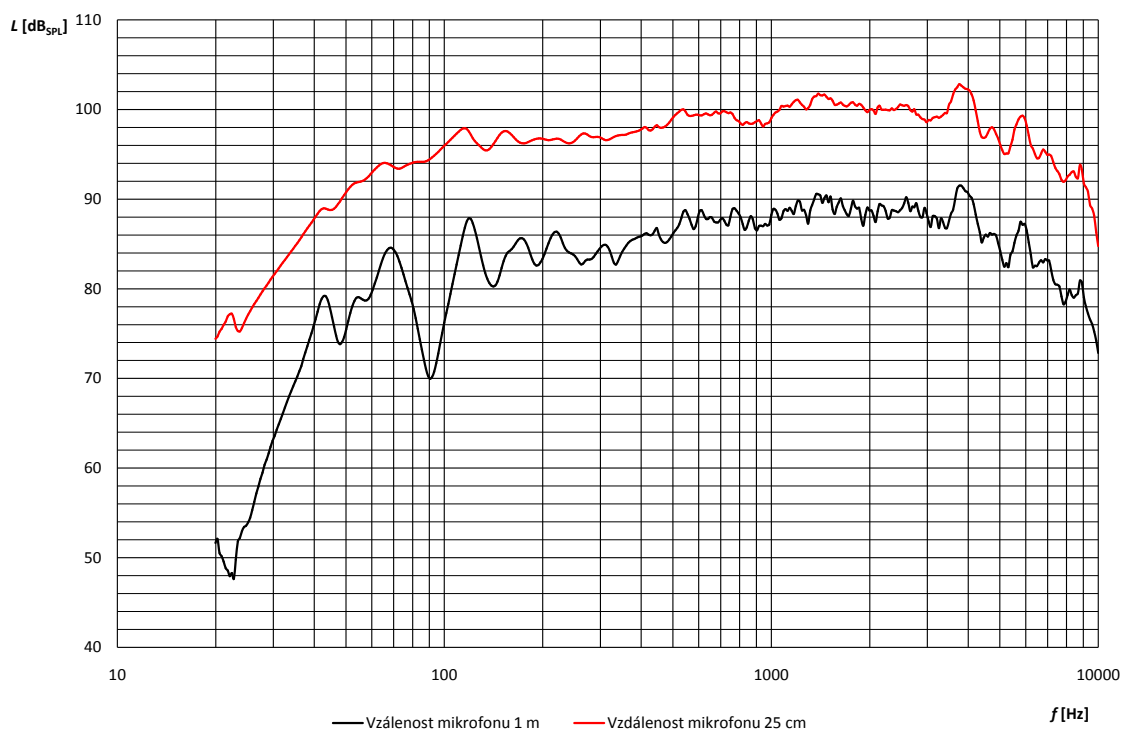
Z průběhu naměřené kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru (obr. 8.15) je vidět, že oproti základní ozvučnici je průběh vyrovnanější a bez propadu od 1,6 kHz do 5 kHz, který způsobují difrakce na hranách.



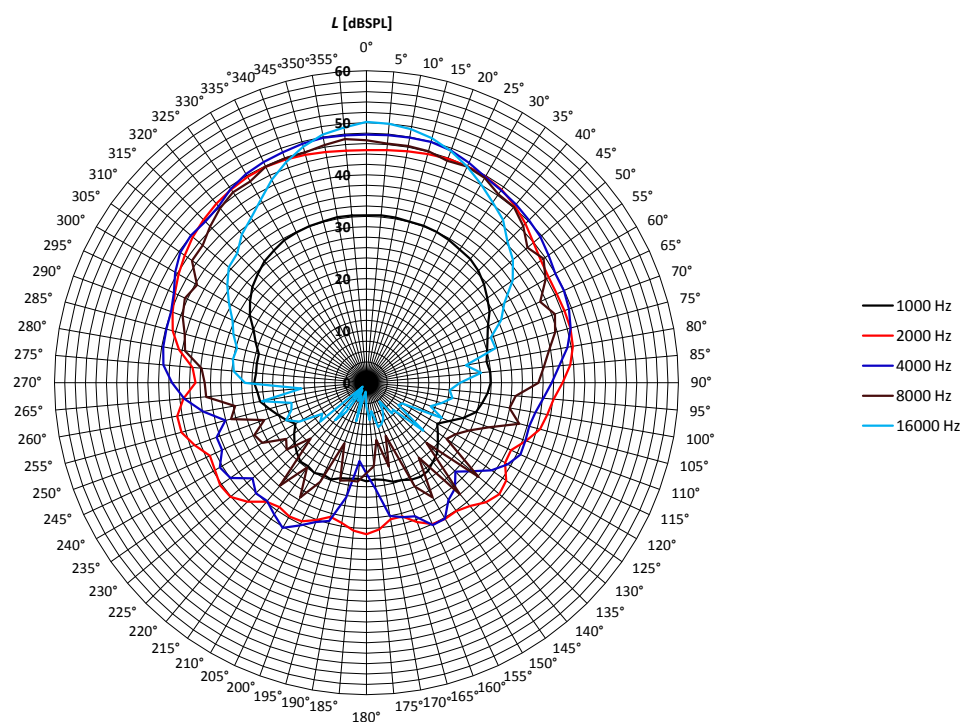
Obr. 8.15: Kmitočtové charakteristiky výškového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami

Na obr. 8.16 je vidět průběh kmitočtové charakteristiky středobasového reproduktoru ve vzdálenosti měřicího mikrofonu 1 metr a 25 cm. Vůči základní ozvučnici je průběh lehce vyrovnanější pod 500 Hz z důvodu zmenšení vlivu baffle stepu.

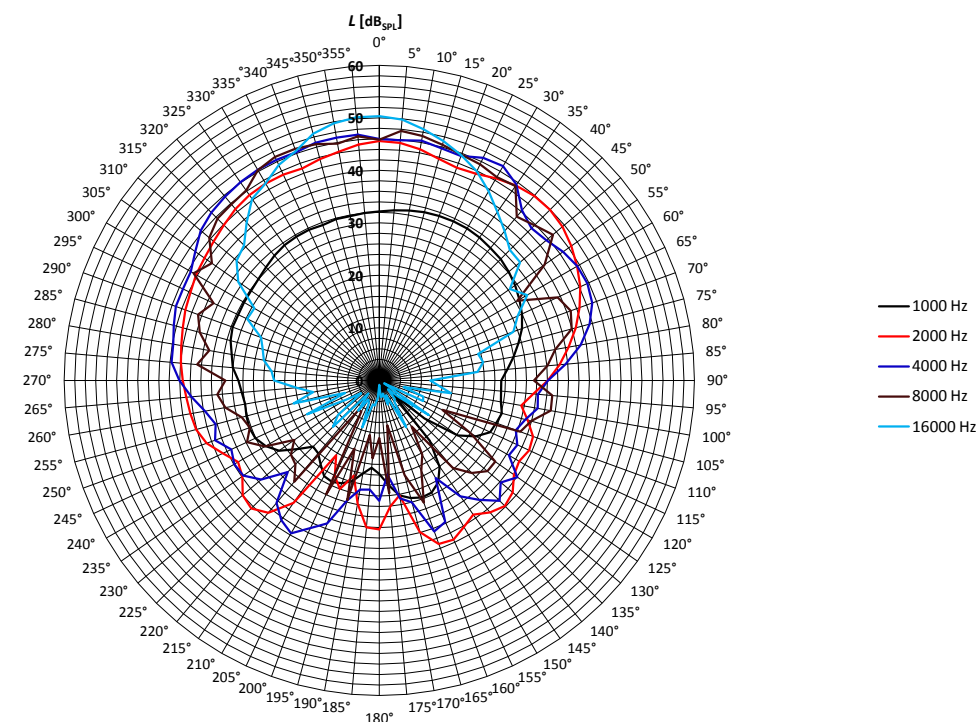
Pro tento typ ozvučnice byly dále změřeny směrové charakteristiky pro každý reproduktor v horizontální (obr. 8.17 a obr. 8.19) i vertikální rovině (obr. 8.18 a obr. 8.20).



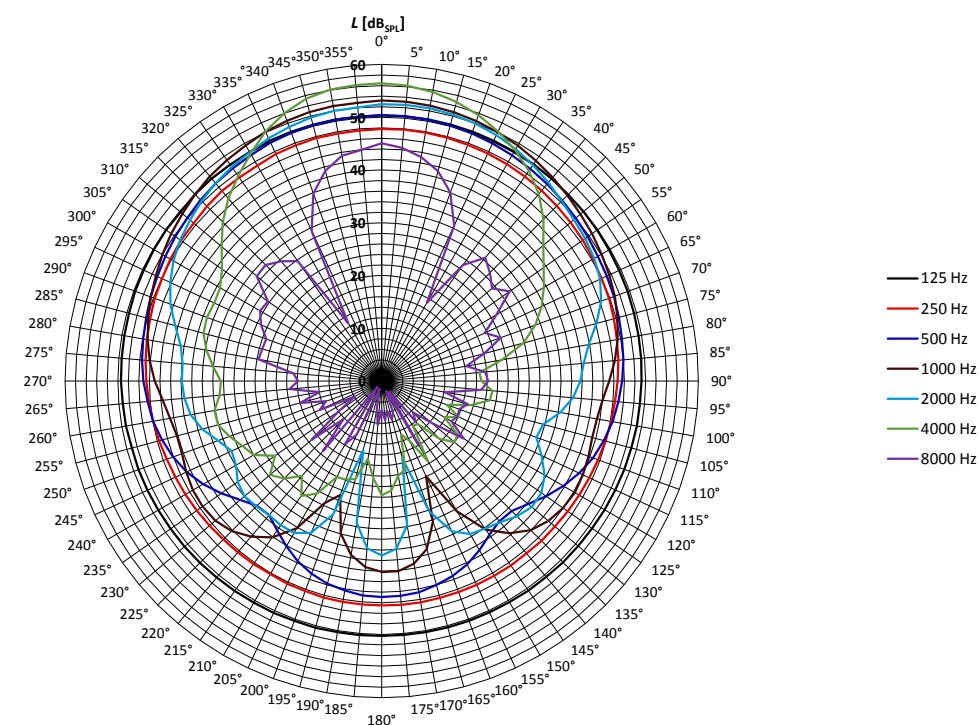
Obr. 8.16: Kmitočtové charakteristiky středobasového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami



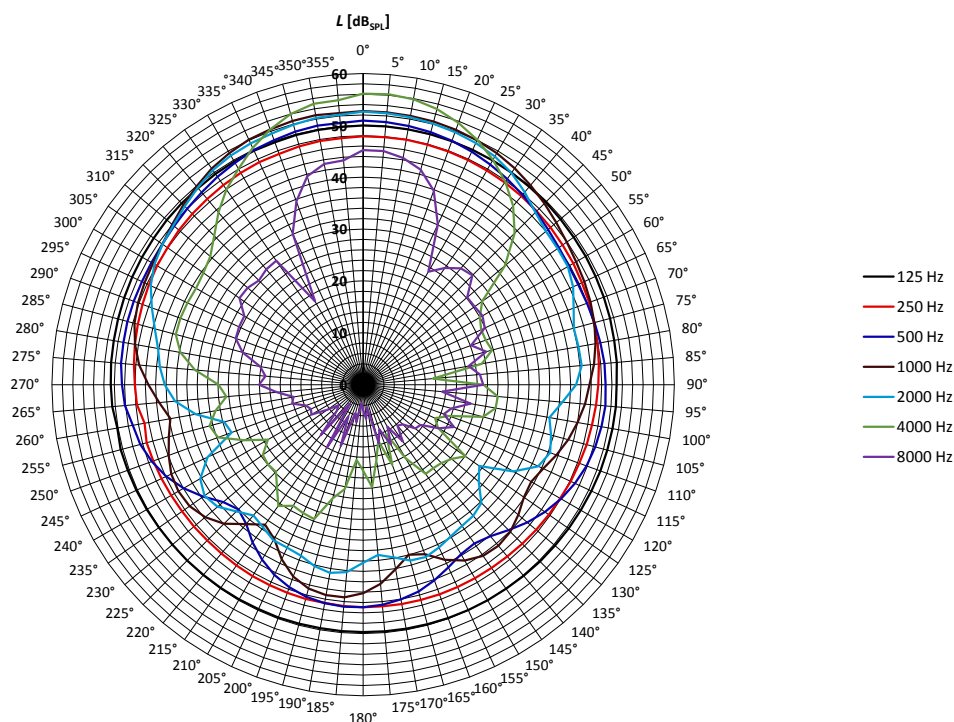
Obr. 8.17: Směrová charakteristika výškového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami – horizontální rovina



Obr. 8.18: Směrová charakteristika výškového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami – vertikální rovina



Obr. 8.19: Směrová charakteristika středobasového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami – horizontální rovina

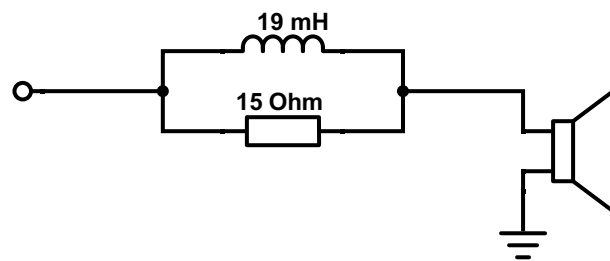


Obr. 8.20: Směrová charakteristika středobasového reproduktoru v dvoupásmové ozvučnici se zaoblenými hranami – vertikální rovina

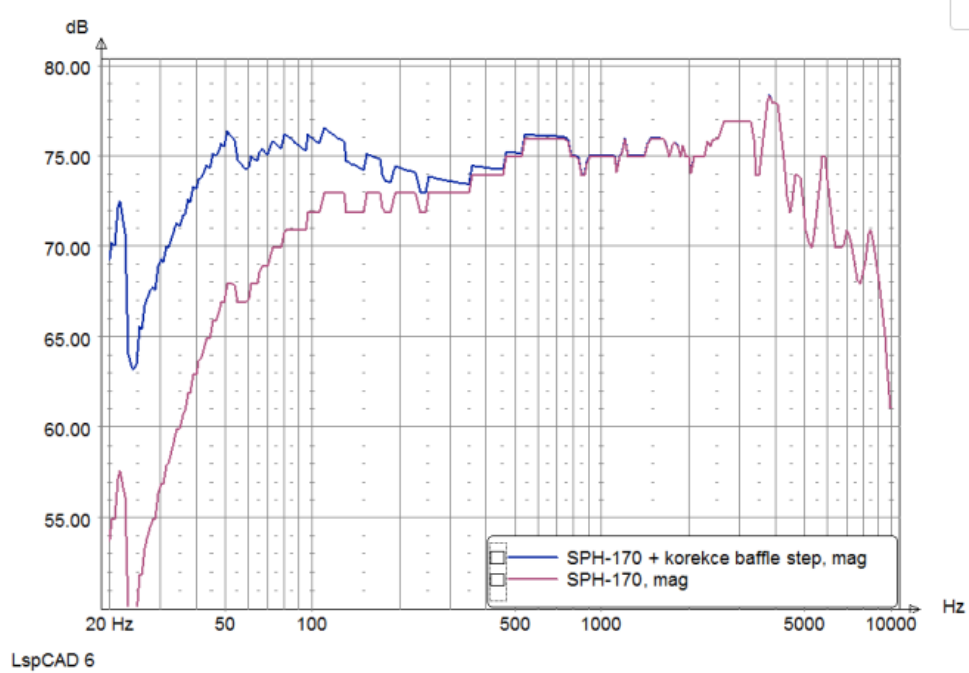
8.2.3 Parametry pro návrh kmitočtových výhybek

Z naměřených průběhů kmitočtových a směrových charakteristik lze určit základní parametry potřebné při návrhu kmitočtové výhybky. Dělicí kmitočet výhybky by se měl pohybovat v rozmezí 1,6–3 kHz, kdy má ještě středobasový reproduktor vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku a výškový reproduktor má již ustálený průběh. Dále by měla výhybka obsahovat útlumový článek výškového reproduktoru, který bude tlumit signál o 5 dB z důvodu větší citlivosti výškového reproduktoru. Pro středobasový reproduktor by měla být realizovaná korekce baffle stepu, která vyrovná propad kmitočtové charakteristiky na kmitočtech menších než 500 Hz.

Pro lepší představu vlivu baffle stepu jsem provedl simulaci a návrh pasivní korekce v programu LspCAD. Na průbězích simulace (obr.8.22) jsou vidět průběhy reproduktoru SPH-170 v základní ozvučnici s korekcí baffle stepu a bez korekce. Korekce baffle stepu je realizována paralelní kombinací odporu a cívky, hodnoty jednotlivých součástek jsou uvedeny v zapojení na obr.8.21. Z průběhu je zřejmé, že díky korekci bude reproduktor schopen daleko lepe vyzařovat nižší kmitočty a zvětší tak jeho frekvenční rozsah. Pro vyrovnání propadu na frekvenci 150–500 Hz bude zapotřebí použít další korekční obvod nebo aktivní korekci baffle stepu.



Obr. 8.21: Pasivní korekce baffle stepu



Obr. 8.22: Simulace korekce baffle stepu

9 Tvorba laboratorních úloh

Dle zadání této práce je jeden z výstupů zhotovení tří laboratorních úloh. Laboratorní úlohy budou využívat navržené a zrealizované přípravky v této práci. Po absolvování těchto laboratorních úloh by měli studenti být schopni definovat vliv jednotlivých typů ozvučnic a vliv vzájemné polohy reproduktorů na kmitočtovou a směrovou charakteristiku.

9.1 Požadavky na laboratorní úlohy

Během první laboratorní úlohy budou studenti měřit vliv tvaru ozvučnice výškového reproduktoru na kmitočtové a směrové charakteristiky. Pro měření budou použity moduly výškového reproduktoru:

- Kruhová ozvučnice
- Obdélníková ozvučnice s reproduktorem v geometrickém středu
- Symetrická obdélníková ozvučnice
- Symetrická obdélníková ozvučnice s boky
- Nesymetrická obdélníková ozvučnice s boky
- Modul typu kapky

Ozvučnice jsou navrženy tak, aby jejím postupným měřením byla vidět postupná eliminace vlivu difrakcí na kmitočtovou charakteristiku. Studenti změří pro každý typ ozvučnice kmitočtovou charakteristiku pod úhlem 0° , 20° , 40° a 60° měřicího mikrofónu vůči akustické ose výškového reproduktoru. Dále změří směrové charakteristiky pro symetrickou obdélníkovou ozvučnici s boky a nesymetrickou obdélníkovou ozvučnici s boky, z jejichž průběhu bude vidět vliv vyosení reproduktoru v ozvučnici.

Druhá úloha se bude zabývat měřením a následným srovnáním vlastností dvoupásmových reproduktorových soustav. Pro měření budou využity přípravky navrženy v této práci:

- Základní dvoupásmová ozvučnice
- Dvoupásmová ozvučnice se zaoblenými hranami
- Dvoupásmová ozvučnice s vzájemnou variabilní polohou reproduktorů

Měřené ozvučnice jsou navrženy od základního řešení, které neřeší vliv difrakcí na kmitočtovou charakteristiku, až po ozvučnici, na které by vliv difrakcí měl být minimální. U základní ozvučnice budou studenti měřit vertikální a horizontální směrovou charakteristiku pouze uzavřené ozvučnice s tlumením a kmitočtové charakteristiky pro tyto konfigurace ozvučnice:

- Otevřené ozvučnice
- Uzavřené ozvučnice bez vnitřního tlumení
- Uzavřené ozvučnice s vnitřním tlumením

Pro zbylé dvě ozvučnice budou měřit kmitočtovou charakteristiku pod úhlem 0° , 20° , 40° a 60° měřicího mikrofону vůči akustické ose výškového reproduktoru a směrové charakteristiky ozvučnic v horizontální i vertikální rovině.

Třetí úloha nešla do odevzdání práce zrealizovat proto, že kmitočtová výhybka, která měla být vypracována v jiné diplomové práci, nebyla do odevzdání zhotovena a nelze tedy přesně definovat požadavky na měření.

9.2 Návod y k úlohám

Jednotlivé laboratorní úlohy jsou sepsány, dle uvedených požadavků v kap. 9.1 a jsou přiloženy k této práci v elektronické podobě. Z důvodů, že modul dvoupásmové ozvučnice s vzájemnou variabilní polohou reproduktorů nebyl při odevzdání zhotoven, stejně tak jako kmitočtové výhybky, které dvoupásmové reproduktorové soustavy budou využívat, jsou návody napsány jako koncept, který bude optimalizován po dokončení všech zmíněných částí.

10 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo nastudování postupu návrhu ozvučnice pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu zaměřené především na problematiku geometrie ozvučnice a umístění reproduktorů, které ovlivňují výsledné charakteristiky reproduktorové soustavy. Dále se práce zabývá návrhem a realizací modulárních systémů pro měření charakteristik dvoupásmových reproduktorových soustav. Posledním cílem diplomové práce bylo vypracovat tři laboratorní úlohy, které budou využívat mnou navržené moduly.

V této práci je navrženo dohromady devět měřicích přípravků, které lze rozdělit do dvou větších skupin. První skupina přípravků využívá pouze výškový reproduktor Monacor DT-25N a obsahuje šest samostatných modulů:

- Kruhová ozvučnice
- Obdélníková ozvučnice s reproduktorem v geometrickém středu
- Symetrická obdélníková ozvučnice
- Symetrická obdélníková ozvučnice s boky
- Nesymetrická obdélníková ozvučnice s boky
- Modul typu kapky

Pro prvních pět modulů bude možnost jednoduché výměny reproduktoru tak, aby ve všech modulech byl při měření použit jeden výškový reproduktor a výsledky se tak daly jednoduše srovnávat. V modulu typu kapky bude další reproduktor osazen napevno a rozdíl reproduktorů bude zanedbán. Přípravky jsou seřazeny tak, aby se začalo nejhorší variantou s nejsilnějším vznikem difrakcí na hranách a postupně se pokračovalo až po ideální variantu ozvučnice typu kapky. Do druhé skupiny přípravků spadají tři dvoupásmové ozvučnice využívající výškový reproduktor Monacor DT-25N a středobasový reproduktor Monacor SPH-170:

- Základní dvoupásmová ozvučnice
- Dvoupásmová ozvučnice se zaoblenými hranami
- Dvoupásmová ozvučnice se vzájemnou variabilní polohou reproduktorů

U základní dvoupásmové ozvučnice s vnitřním objemem 21,1 litrů není jinak řešena prevence vzniku difrakcí a simuluje tedy stav, kdy navrhující neví nic o vzniku difrakcí. Dále je její konstrukce provedena tak, že díky otevíratelné zadní stěně lze do ozvučnice přidat tlumicí rouno. Díky tomu lze měřením zjistit vliv stojatého vlnění vně ozvučnice na výslednou kmitočtovou charakteristiku. Dvoupásmová ozvučnice se zaoblenými hranami vychází rozměry ze základní dvoupásmové ozvučnice, ale je zde již provedena eliminace vzniku difrakcí. Reprodukory jsou zapuštěny do ozvučnice a přední hrany jsou zaobleny tak, aby na nich nevznikaly difrakce. Poslední typ dvoupásmové ozvučnice je navržen tak, aby bylo možné měnit vzájemnou polohu reproduktoru a měřit její vliv na výsledné směrové a kmitočtové charakteristiky.

Jednotlivé moduly byly vyrobeny z MDF desky tloušťky 18 mm a pro dosažení větší tloušťky byly k sobě slepeny dva a více kusů. Z první skupiny přípravků bylo zcela zhotoveno a změřeno prvních pět přípravků, jejichž vlastnosti odpovídají teoretickým předpokladům a splňují požadavky na začlenění do laboratorní úlohy. Z druhé skupiny byla zcela vyrobena a změřena základní dvoupásmová ozvučnice, u které byl ověřen vliv stojatého vlnění a jeho tlumení na výslednou kmitočtovou charakteristiku. Dále byla zhotovena a změřena a dvoupásmová ozvučnice se zaoblenými hranami.

Modul typu kapky byl zhotoven dle původního návrhu a změřen, ale průběh jeho kmitočtové charakteristiky nebyl dostačující. Pro optimalizaci byl použit náhradní modul, u kterého byl ručně zvětšen rádius přední hrany, a tím bylo docíleno vyrovnání kmitočtové charakteristiky. Dle zjištěných poznatků byl upraven návrh modulu kapky a musel být též upraven návrh modulu výškového reproduktoru využíteho v dvoupásmové ozvučnici se vzájemnou variabilní polohou reproduktorů. Díky těmto úpravám se nestihly tyto dva přípravky realizovat do odevzdání práce.

Na základě vyrobených přípravků a zjištění jejich reálných vlastností jsou navrženy koncepty dvou laboratorní úloh, na kterých si studenti budou moci ověřit vliv difrakcí na kmitočtové a směrové charakteristiky reproduktorových soustav. Třetí úloha nemohla být vypracována z důvodu nezhotovení kmitočtové výhybky, která je součástí jiné diplomové práce. Po dokončení výhybek a dvoupásmové ozvučnice se vzájemnou variabilní polohou reproduktorů budou laboratorní úlohy doplněny do finální polohy a budou k nim vytvořeny šablony v programu excel.

Literatura

- [1] SCHIMMEL, Jiří. *Elektroakustika*. Brno, 2016. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [2] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy 1. díl*. Dexon, 2001.
- [3] BORWICK, John. *Loud speaker and headphone handbook*. 3rd ed. Boston: Focal Press, 2001. ISBN 0240515781.
- [4] OLSON, Harry F. *Direct Radiator Loudspeaker Enclosures* [online]. 27.10.1950, , 5 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <http://www.dwdrums.com/images/moonmic/olson_direct-radiator-loudspeaker-enclosures.pdf>
- [5] OLSON, Harry F. *Elements of Acoustical Engineering*. 2nd edition. Canada: D. Van Nostrand Company, 1957. 9780343194581.
- [6] SCHIMMEL, Jiří. *Měření charakteristik reproduktorových soustav*. Brno, 2016. Laboratorní úloha č.11. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] SCHIMMEL, Jiří. *Měření impedanční charakteristiky reproduktoru*. Brno, 2016. Laboratorní úloha č.8. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] CALDWELL, J. *Analog, Active Crossover Circuit for Two-Way Loudspeakers 1st ed. Texas Instruments* [online]. 2013 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/ug/tidu035/tidu035.pdf>>
- [9] PEŠEK, Marko. *Nahoru vyzařující reproduktorové soustavy pro 3D Audio*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy II*. [Česko: s.n.], c2010. ISBN 978-80-254-9510-0.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

c	Poddajnost reproduktoru
c'	Poddajnost uzavřené ozvučnice
c_0	Rychlost šíření zvuku
c_B	Poddajnost vnitřního objemu
EBP	Efficiency Bandwidth Product
f	Kmitočet
f_0	Rezonanční kmitočet
f_{dv}	Dělicí kmitočet výhybky
f_d	Dělicí kmitočet
f_h	Kmitočet difrakcí
f_r	Rezonanční kmitočet reproduktoru
h	Hloubka ozvučnice
L	Hladina akustického tlaku
l	Vzájemná vzdálenost reproduktorů z hlediska zapuštění
L_v	Indukčnost cívky
m	Hmotnost
MDF	Polotvrdá dřevovláknitá deska – Medium-Density Fibreboard
MIC	Mikrofon
f_d	Dělicí kmitočet
f_{dv}	Dělicí kmitočet výhybky
f_h	Kmitočet nejsilnějších difrakcí
v_z	Rychlost zvuku
d	Vzájemná vzdálenost akustických os reproduktorů
l	Vzájemná vzdálenost reproduktorů z hlediska zapuštění
λ	Vlnová délka

Seznam příloh

A	Obsah přiloženého CD	89
B	Modulární systém	90
B.1	Výměnný modul výškového reproduktoru	90
B.2	Speakon kabel	90
B.3	Kruhová ozvučnice	91
B.4	Ozvučnice s otvorem v geometrickém středu	91
B.5	Symetrická ozvučnice	92
B.6	Symetrická ozvučnice s boky	92
B.7	Nesymetrická ozvučnice s boky	93
B.8	Základní dvoupásmová ozvučnice	93
B.9	Dvoupásmová ozvučnice se zkosenými hranami	94
C	Naměřené grafy	95
C.1	Impedanční charakteristika reproduktoru SPH-170 č.1	95
C.2	Fázová charakteristika reproduktoru SPH-170 č.1	95
C.3	Impedanční charakteristika reproduktorů SPH-170	96
C.4	Fázová charakteristika reproduktorů SPH-170	96
C.5	Kmitočtové charakteristika kruhové ozvučnice – úhly	97
C.6	Kmitočtové charakteristika ozvučnice s otvorem v geometrickém středu – úhly	97
C.7	Kmitočtové charakteristika symetrické ozvučnice – úhly	98
C.8	Kmitočtové charakteristika symetrické ozvučnice s boky – úhly	98
C.9	Kmitočtové charakteristika nesymetrické ozvučnice s boky – úhly	99
C.10	Směrové charakteristika symetrické ozvučnice s boky – úhly	99
C.11	Směrové charakteristika nesymetrické ozvučnice s boky – úhly	100
C.12	Kmitočtové charakteristika výškového reproduktoru v základní dvou- pásmové ozvučnici	100
C.13	Kmitočtové charakteristika výškového reproduktoru v ozvučnici se zkosenými hranami	101
C.14	Kmitočtové charakteristika středobasového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici	101
C.15	Kmitočtové charakteristika středobasového reproduktoru v ozvučnici se zkosenými hranami	102
D	Upravené moduly výšky	103
D.1	Upravený modul kapky	103

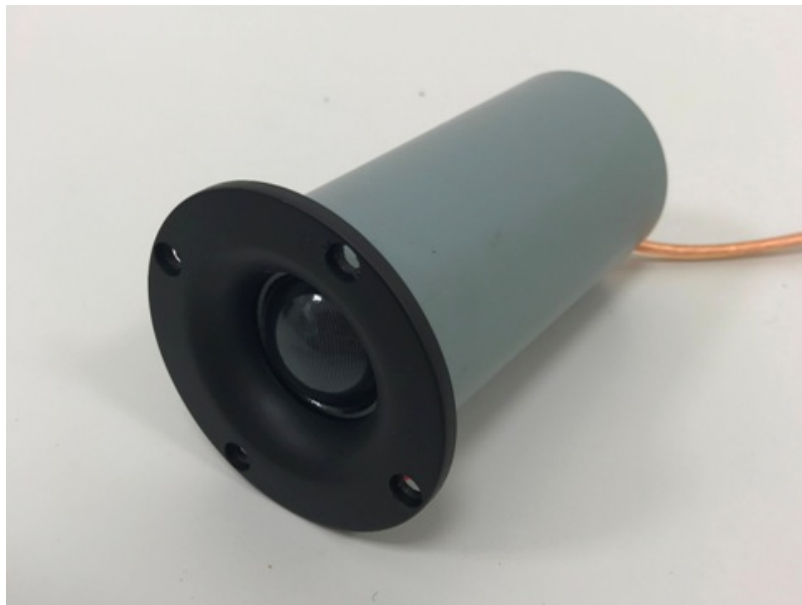
D.2 Upravený modul výškového reproduktoru	103
---	-----

A Obsah přiloženého CD

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── DPxpesek11.pdf ..... Text práce
├── Laboratorní úlohy ..... Koncepty laboratorních úloh
│   ├── Laboratorní úloha č1.pdf
│   └── Laboratorní úloha č2.pdf
```

B Modulární systém

B.1 Výměnný modul výškového reproduktoru



B.2 Speakon kabel



B.3 Kruhová ozvučnice



B.4 Ozvučnice s otvorem v geometrickém středu



B.5 Symetrická ozvučnice



B.6 Symetrická ozvučnice s boky



B.7 Nesymetrická ozvučnice s boky



B.8 Základní dvoupásmová ozvučnice

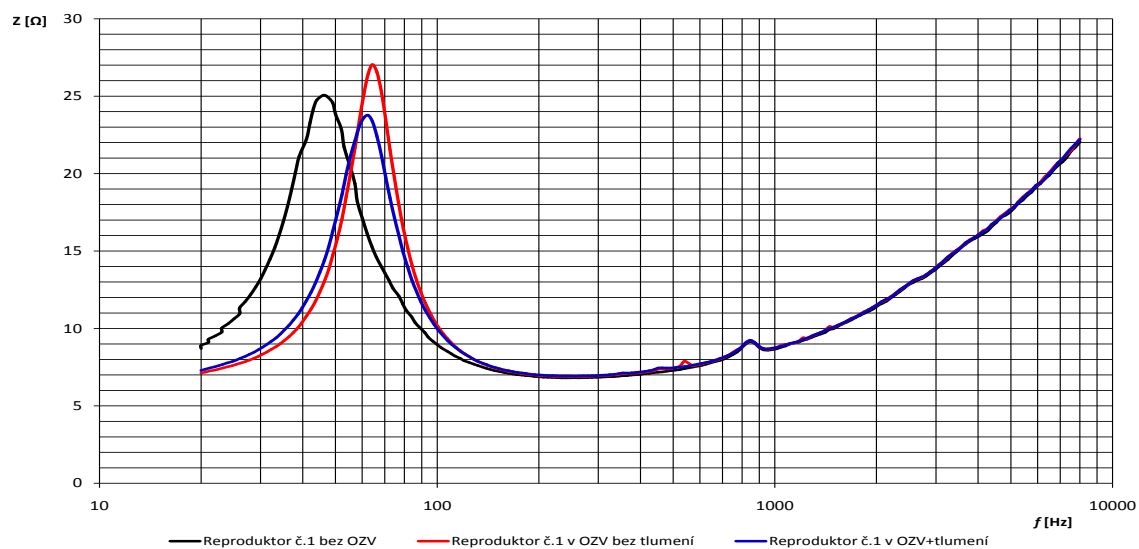


B.9 Dvoupásmová ozvučnice se zkosenými hranami

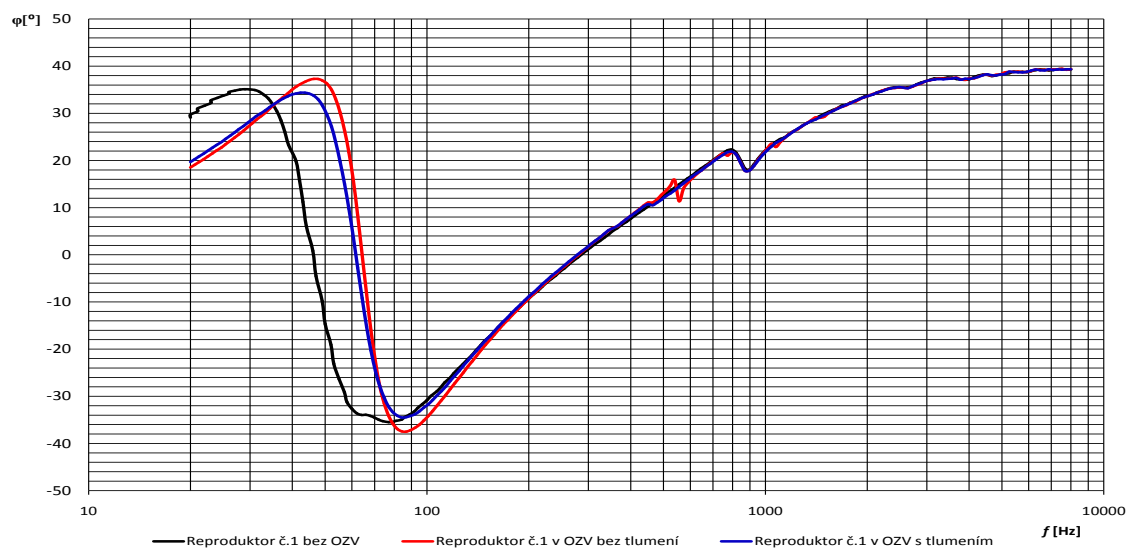


C Naměřené grafy

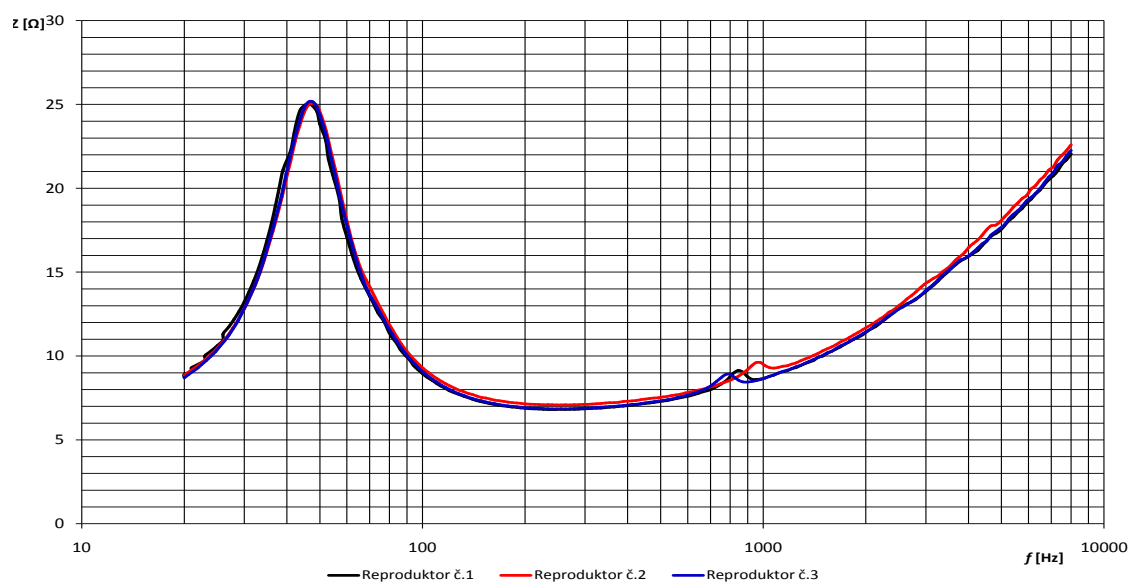
C.1 Impedanční charakteristika reproduktoru SPH-170 č.1



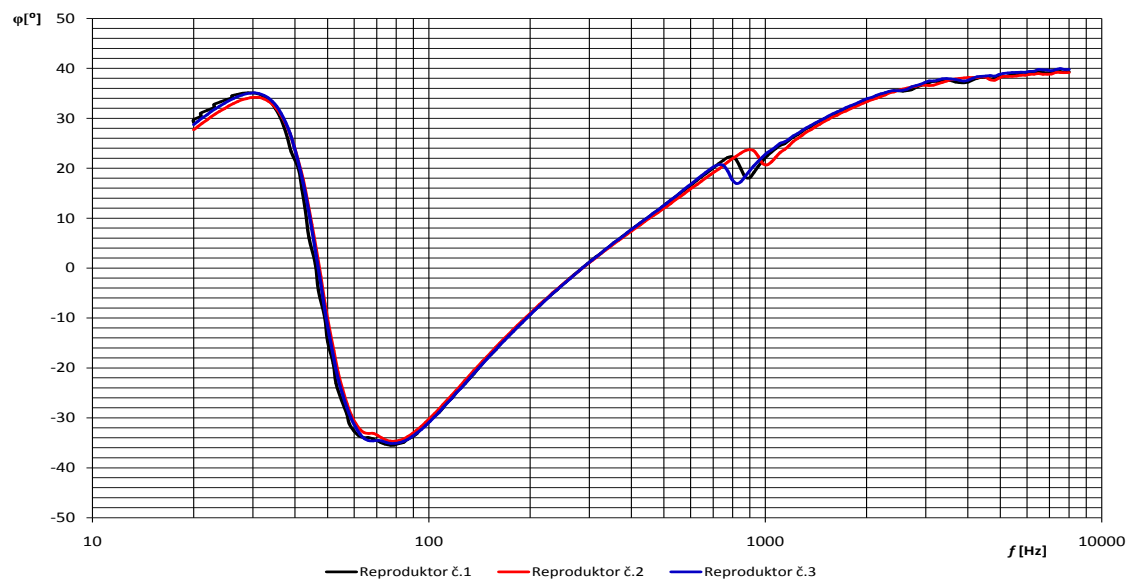
C.2 Fázová charakteristika reproduktoru SPH-170 č.1



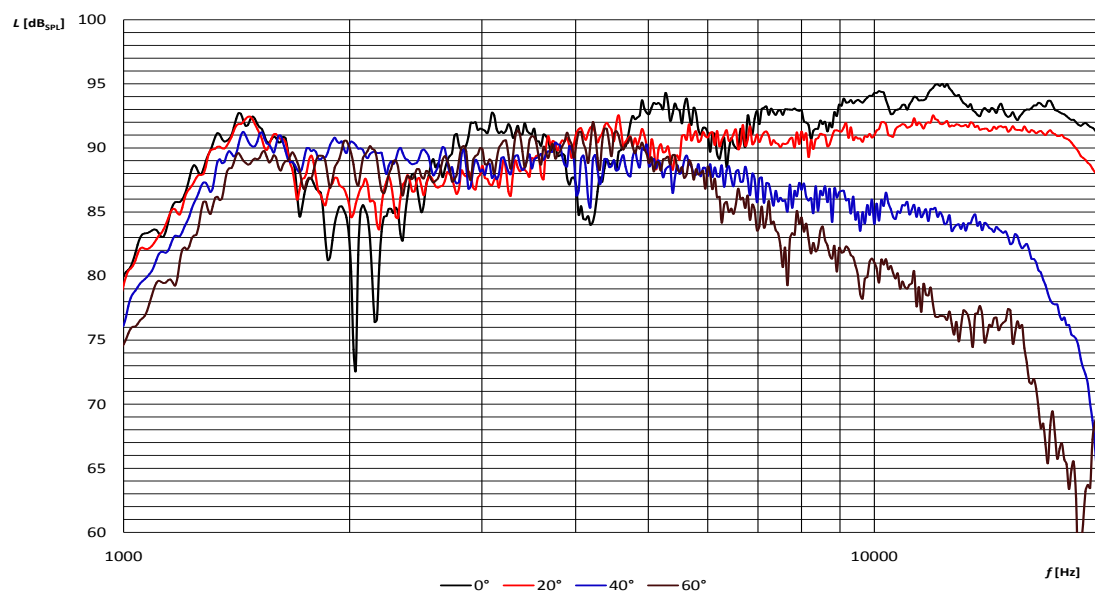
C.3 Impedanční charakteristika reproduktorů SPH-170



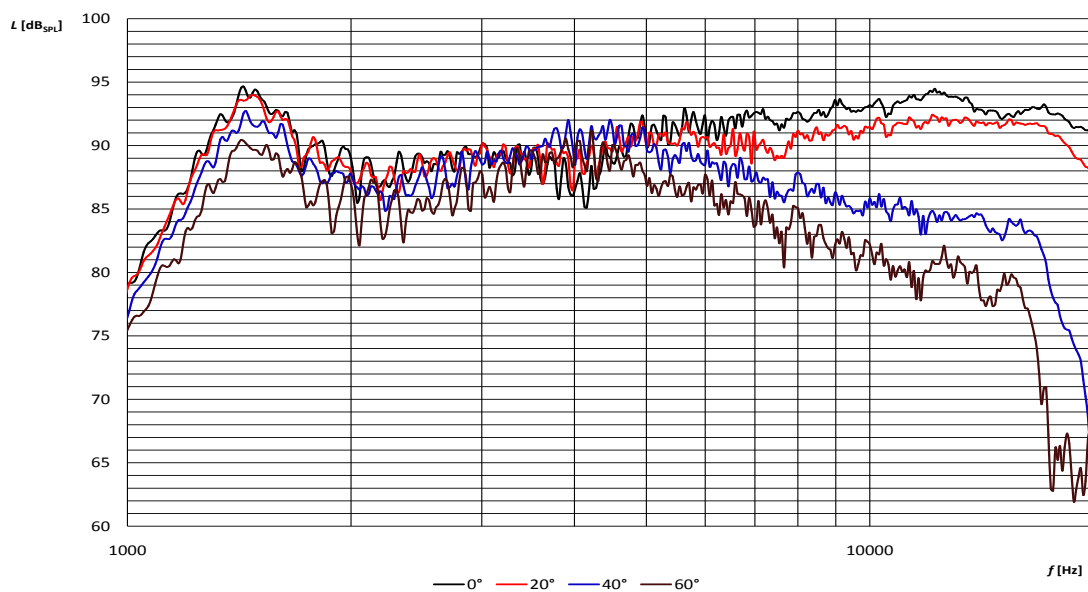
C.4 Fázová charakteristika reproduktorů SPH-170



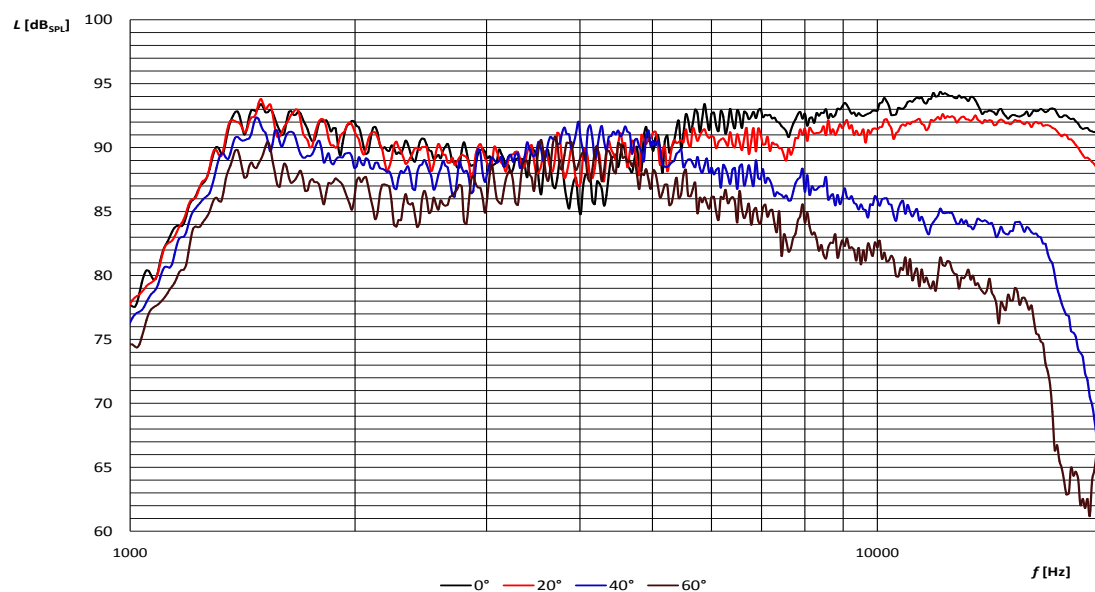
C.5 Kmitočtové charakteristika kruhové ozvučnice – úhly



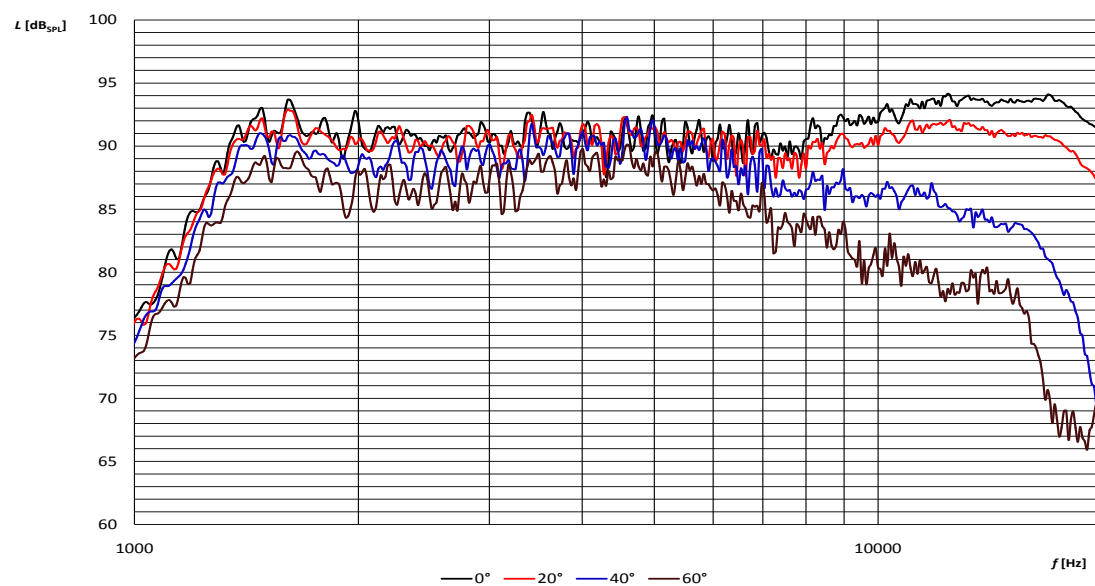
C.6 Kmitočtové charakteristika ozvučnice s otvorem v geometrickém středu – úhly



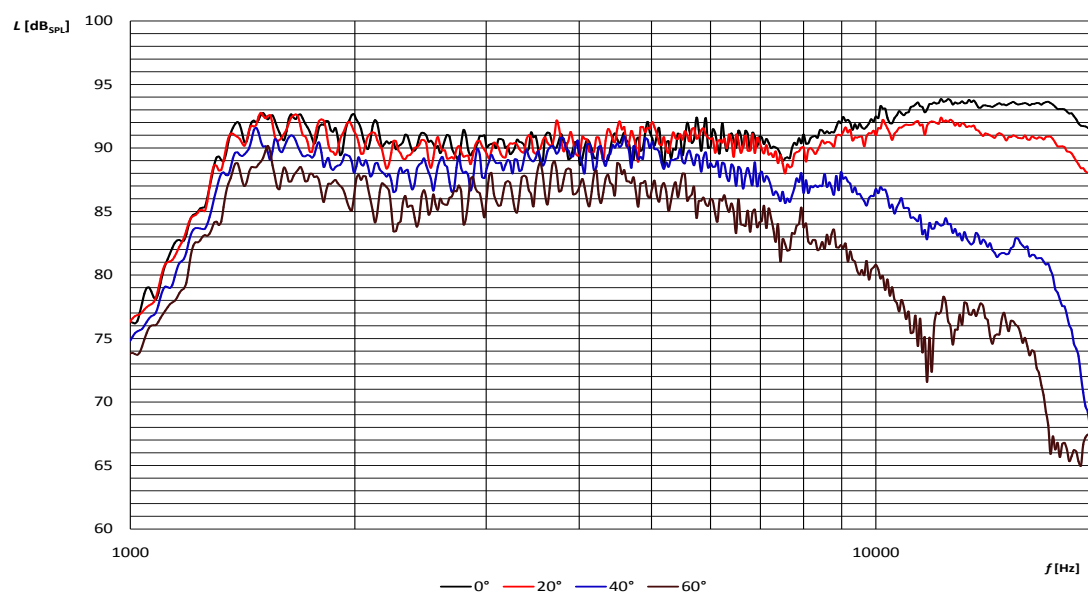
C.7 Kmitočtové charakteristika symetrické ozvučnice – úhly



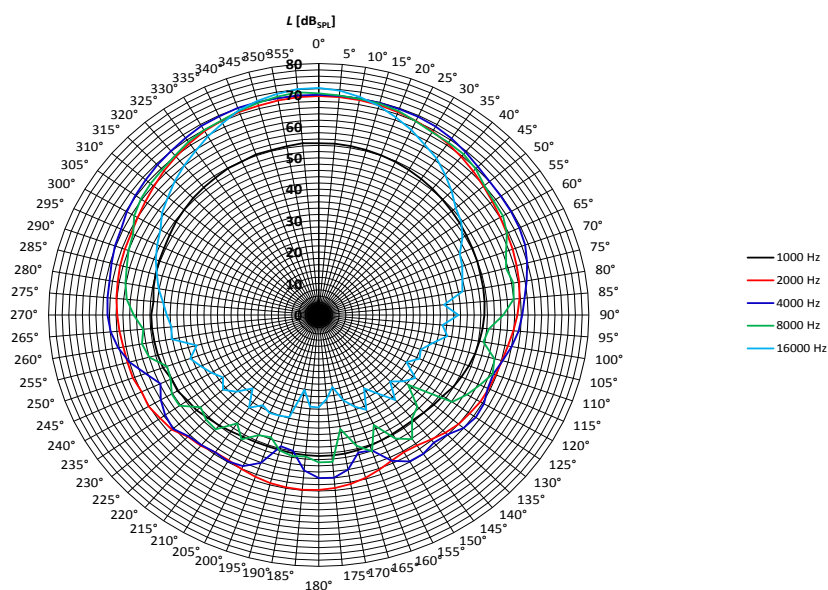
C.8 Kmitočtové charakteristika symetrické ozvučnice s boky – úhly



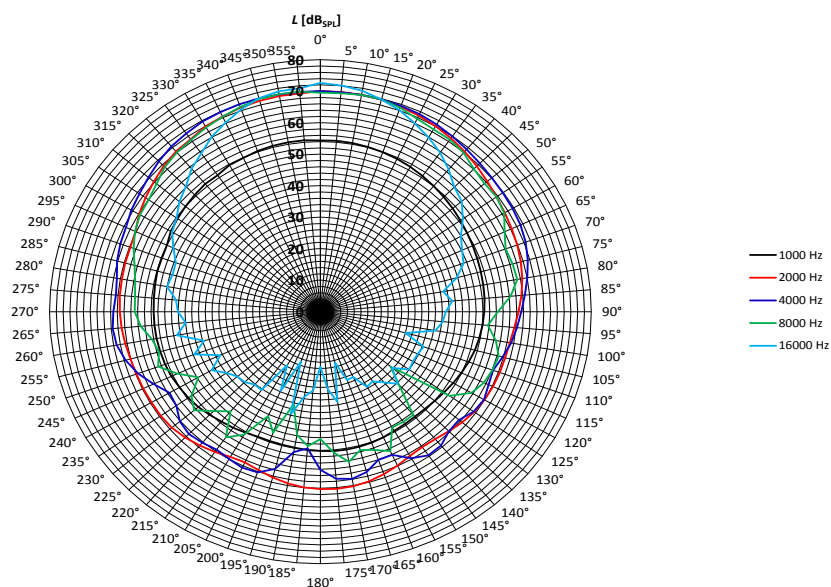
C.9 Kmitočtové charakteristika nesymetrické ozvučnice s boky – úhly



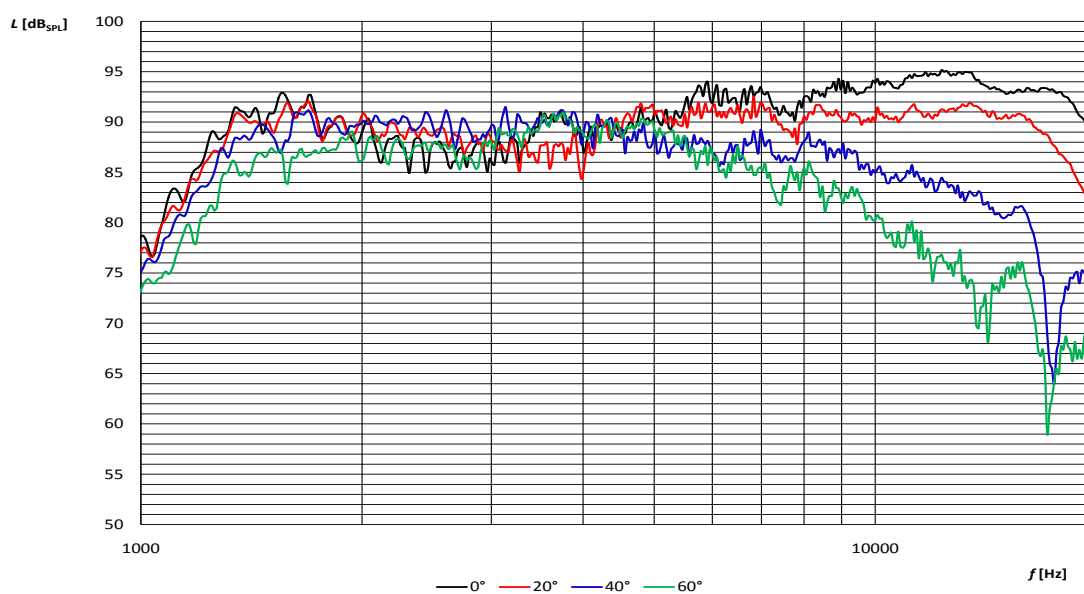
C.10 Směrové charakteristika symetrické ozvučnice s boky – úhly



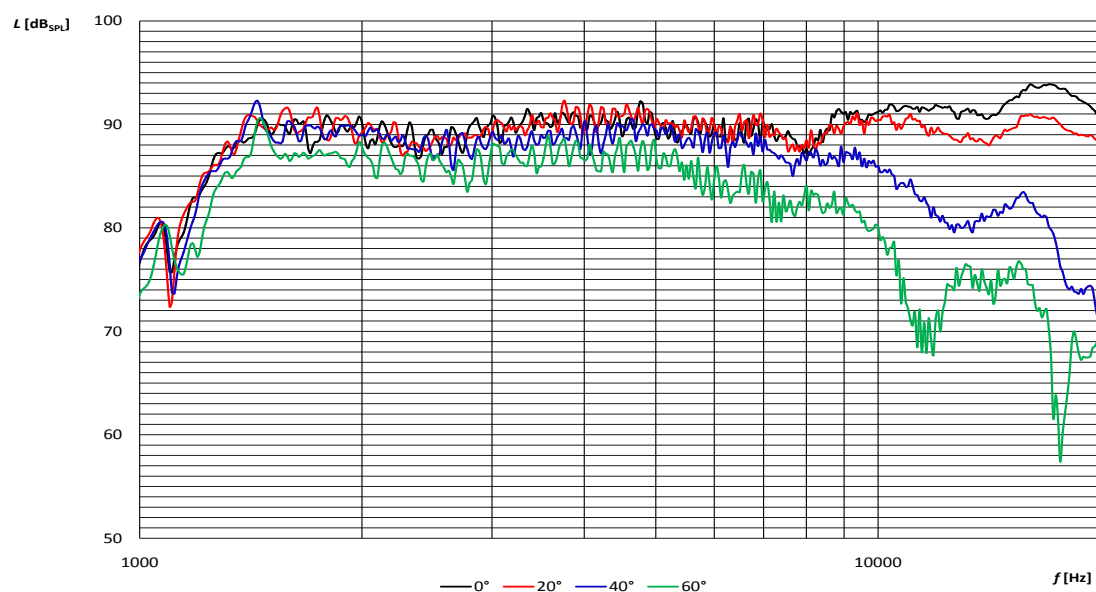
C.11 Směrové charakteristika nesymetrické ozvučnice s boky – úhly



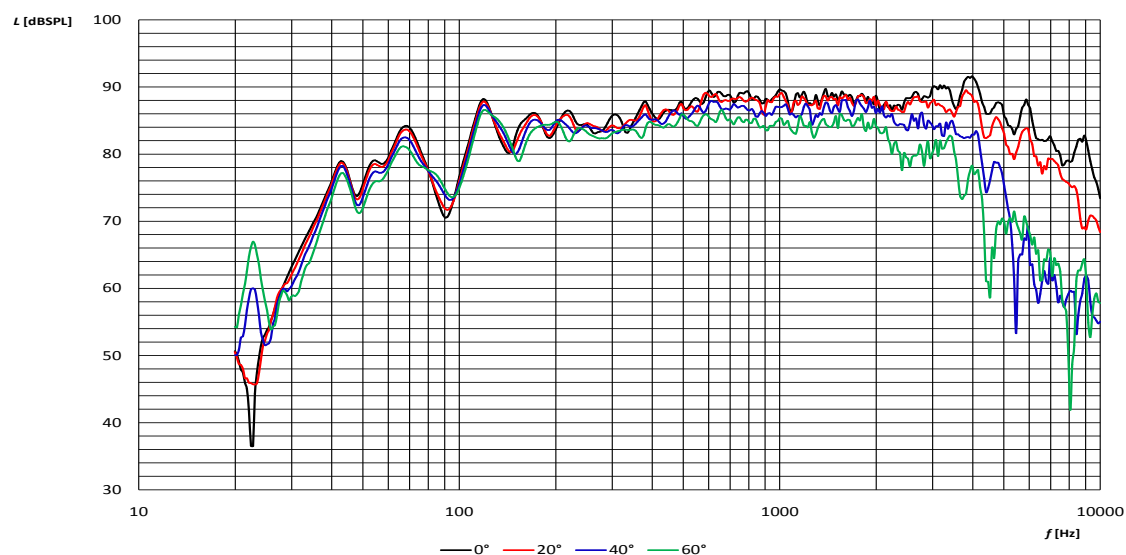
C.12 Kmitočtové charakteristika výškového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici



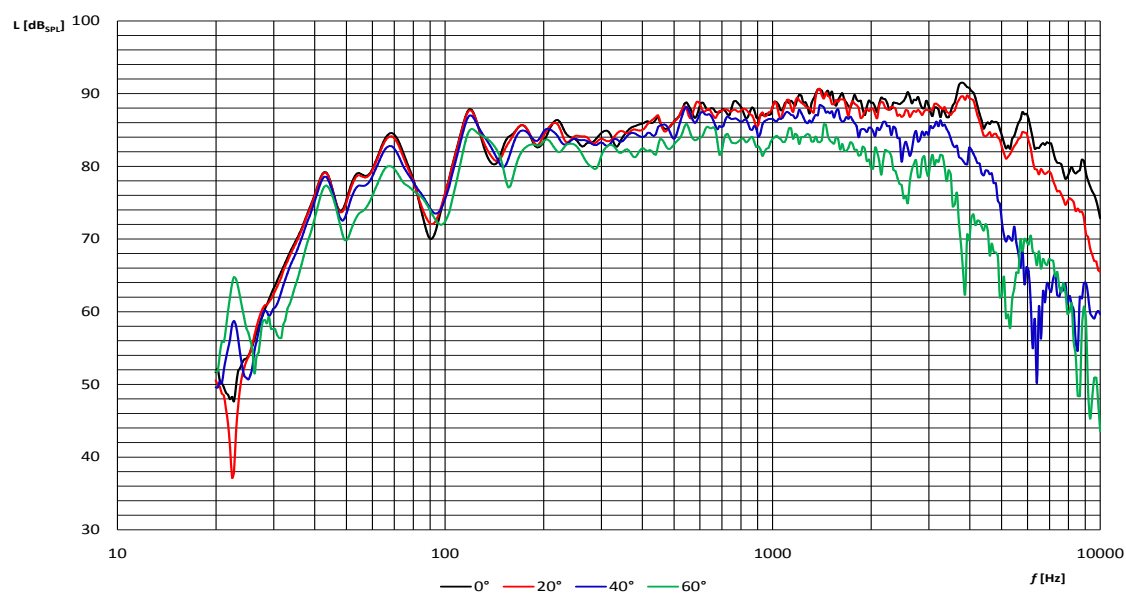
C.13 Kmitočtové charakteristika výškového reproduktoru v ozvučnici se zkosenými hranami



C.14 Kmitočtové charakteristika středobasového reproduktoru v základní dvoupásmové ozvučnici

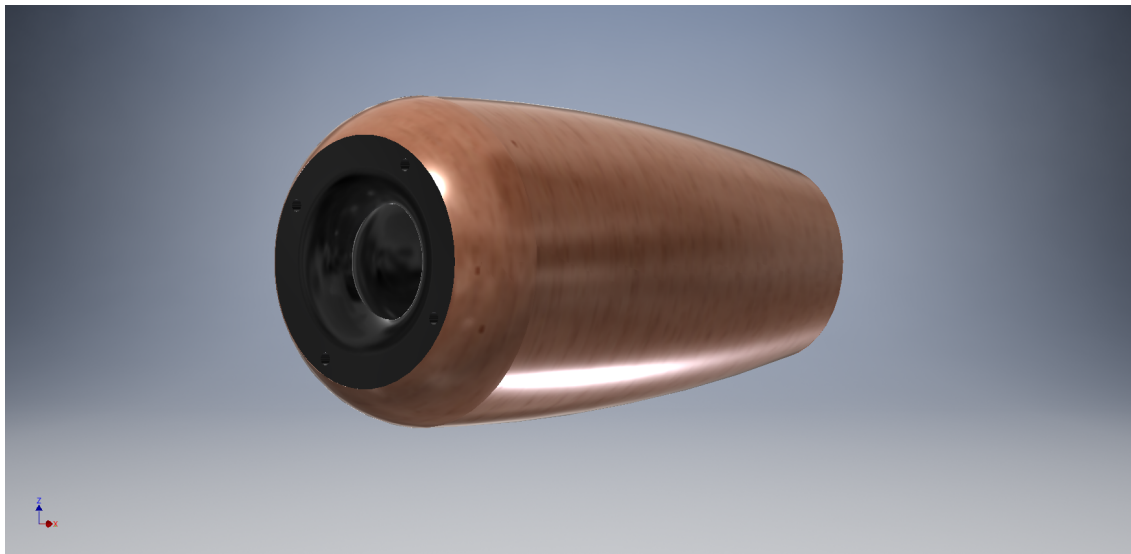


C.15 Kmitočtové charakteristika středobasového reproduktoru v ozvučnici se zkosenými hranami

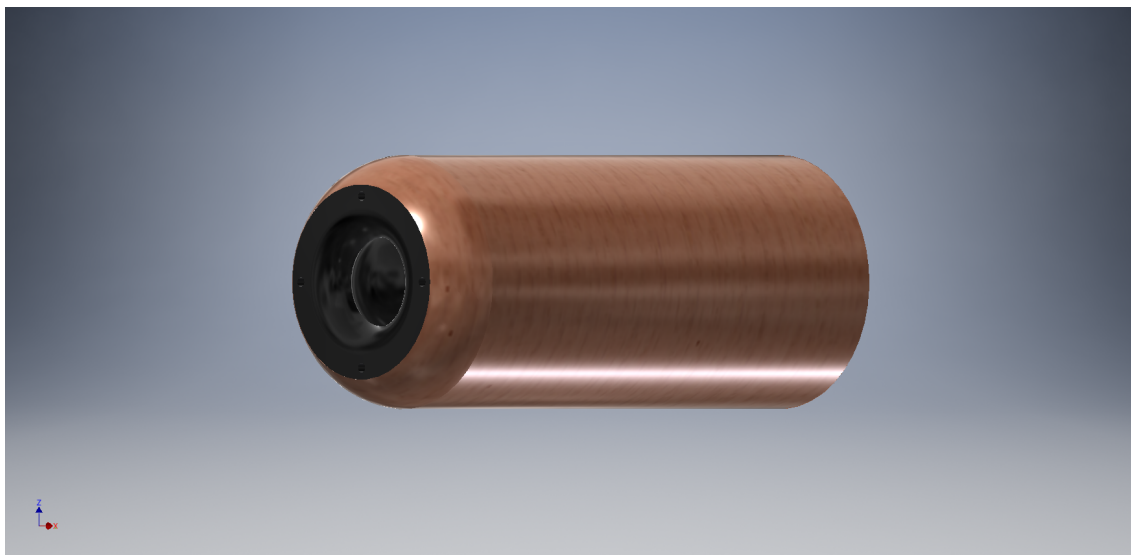


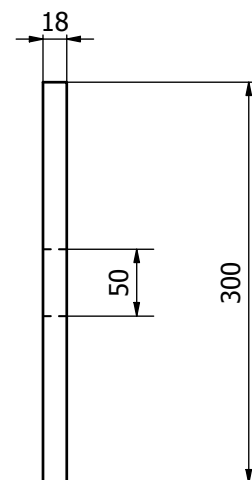
D Upravené moduly výšky

D.1 Upravený modul kapky

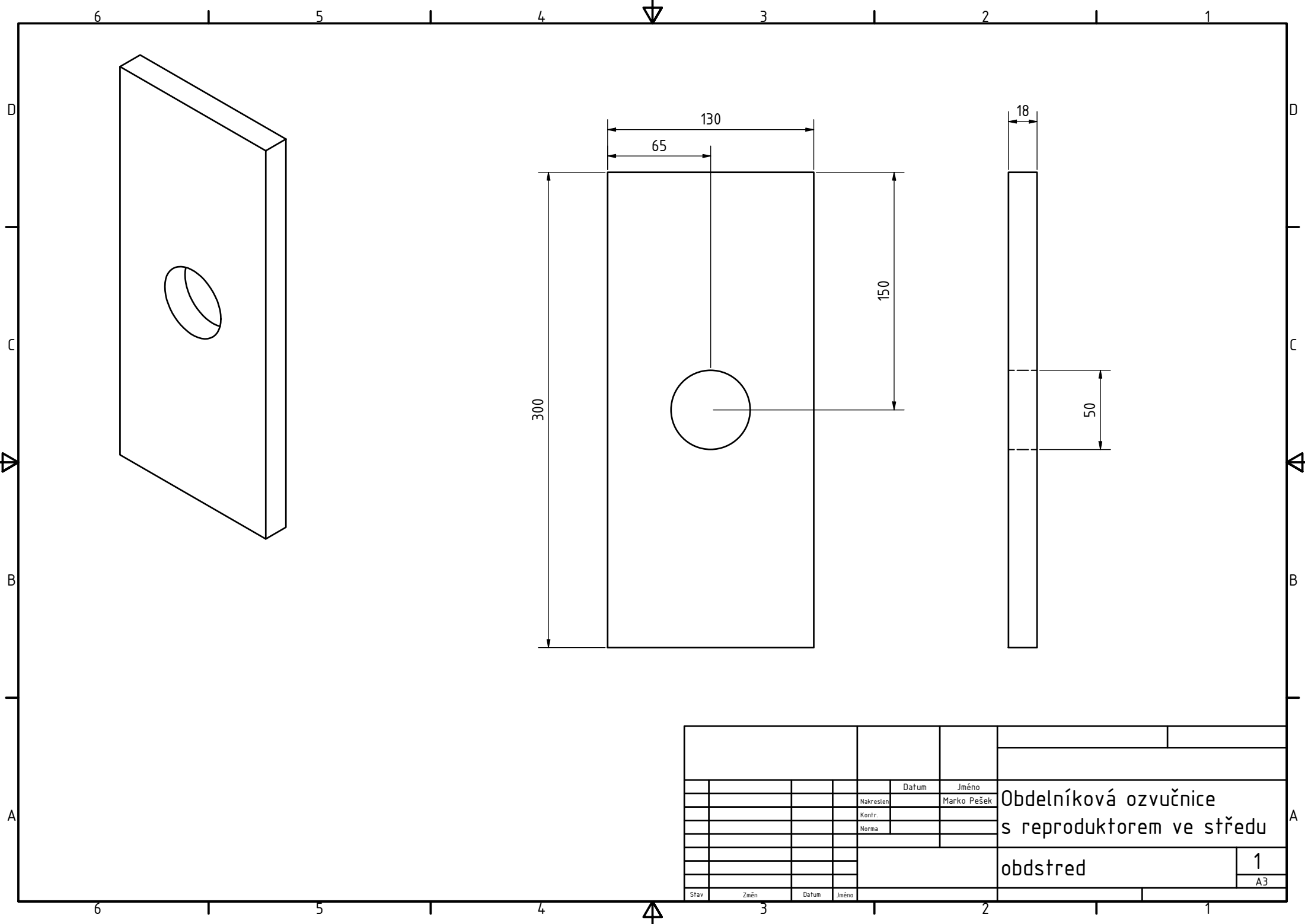


D.2 Upravený modul výškového reproduktoru

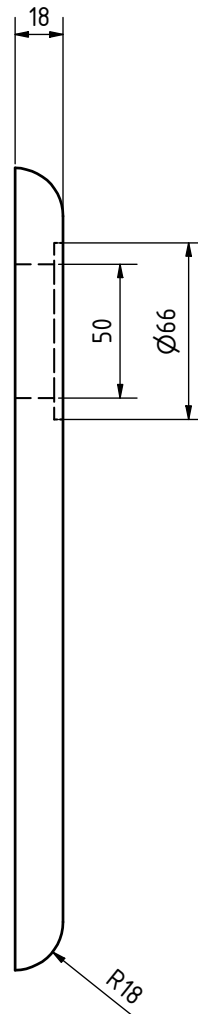
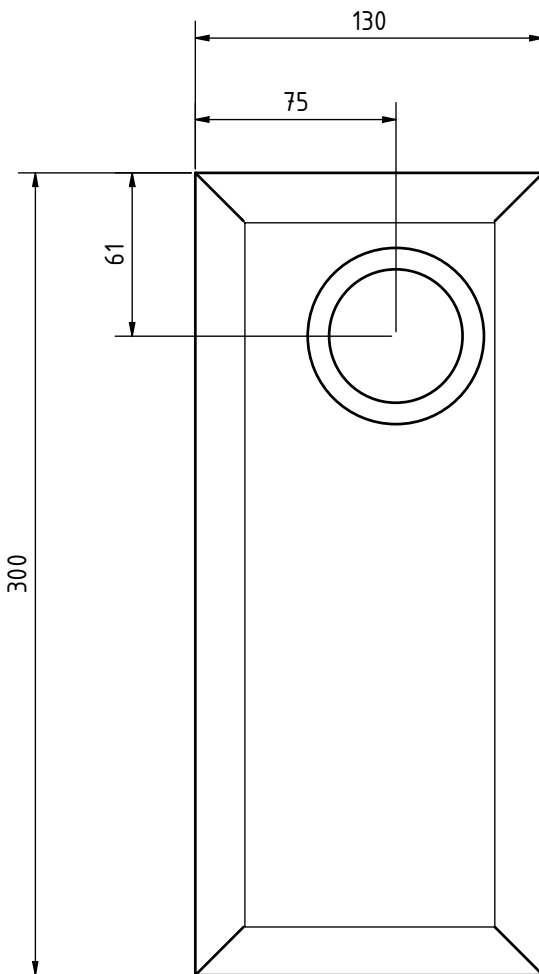
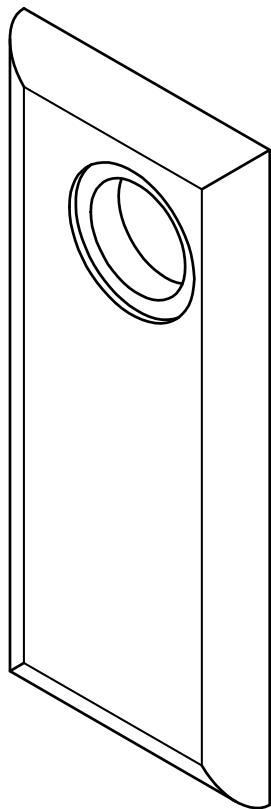




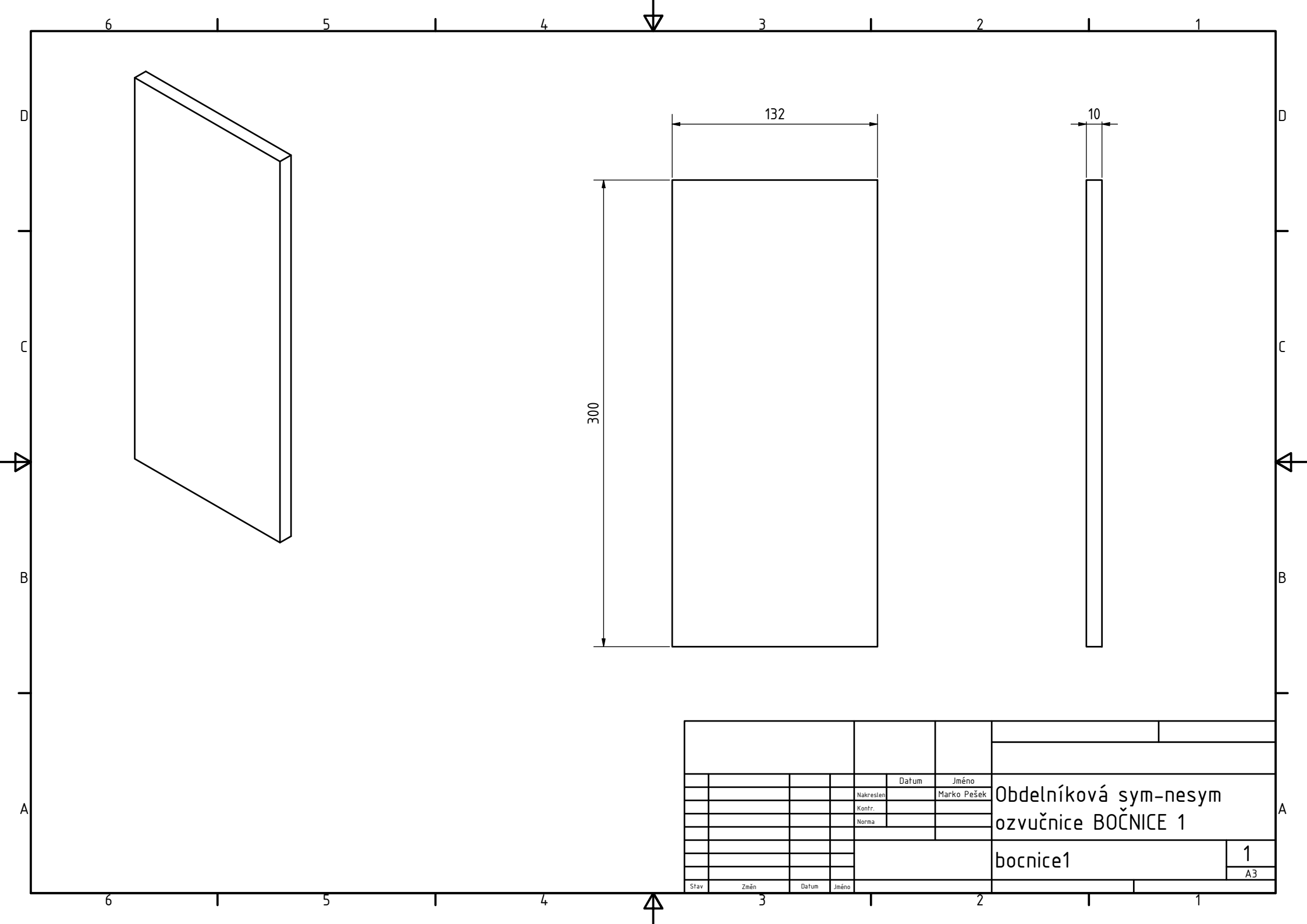
					Datum	Jméno	Kruhová ozvučnice		
				Nakreslen		Marko Pešek			
				Kontr.					
				Norma					
							1		
Stav	Změn	Datum	Jméno				A3		

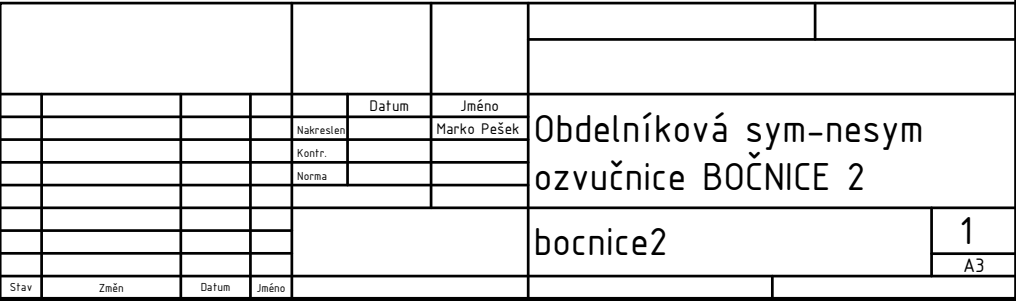


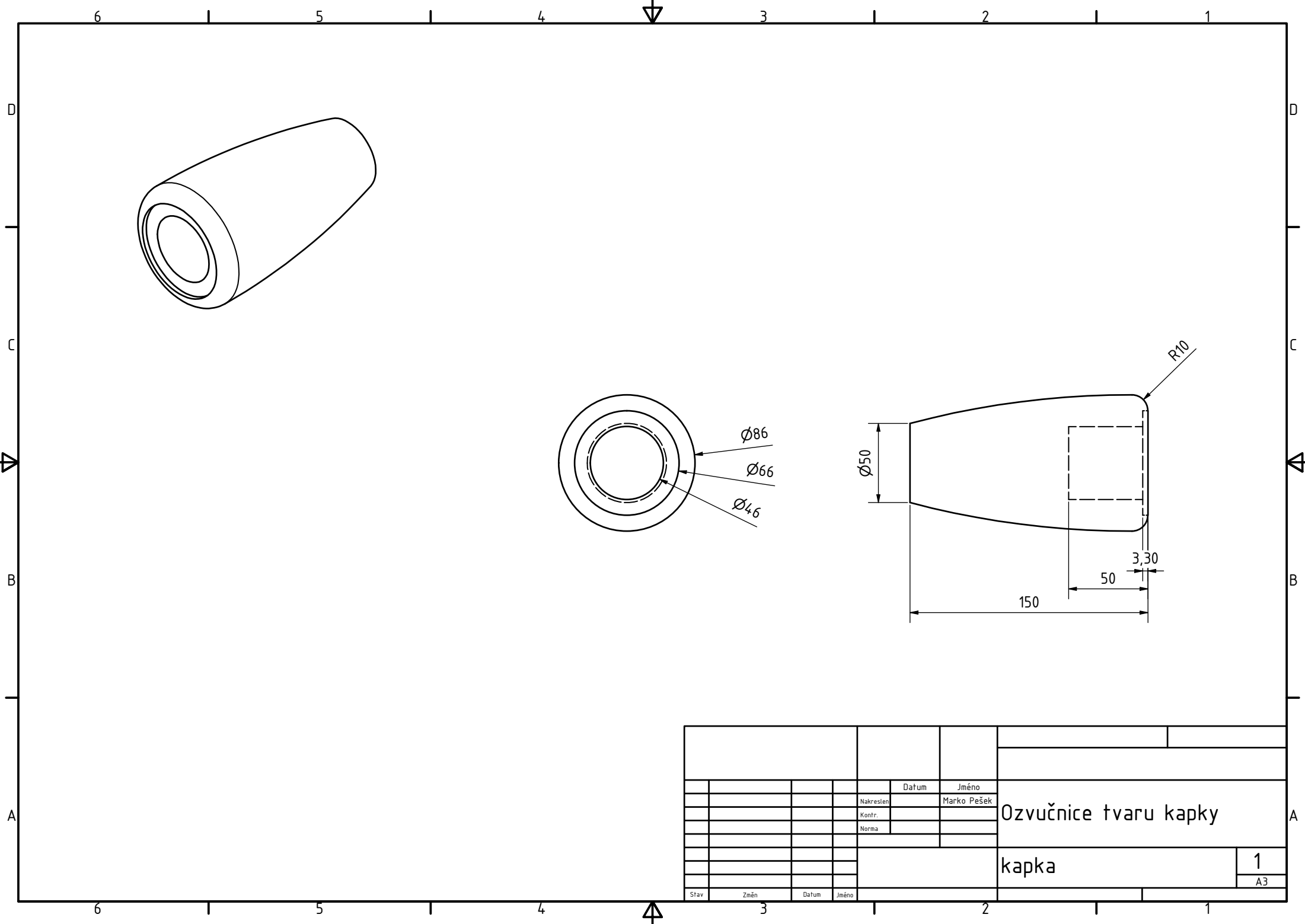
					Datum	Jméno		Obdelníková ozvučnice s reproduktorem ve středu	
				Nakreslen		Marko Pešek			
				Konfr.					
				Norma					
								obdstred	
								1	
								A3	
Stav	Změn	Datum	Jméno						

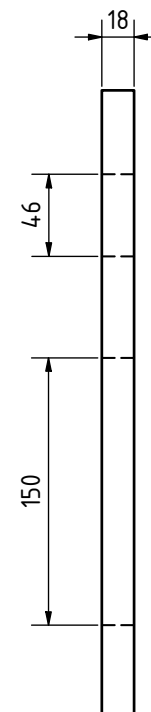
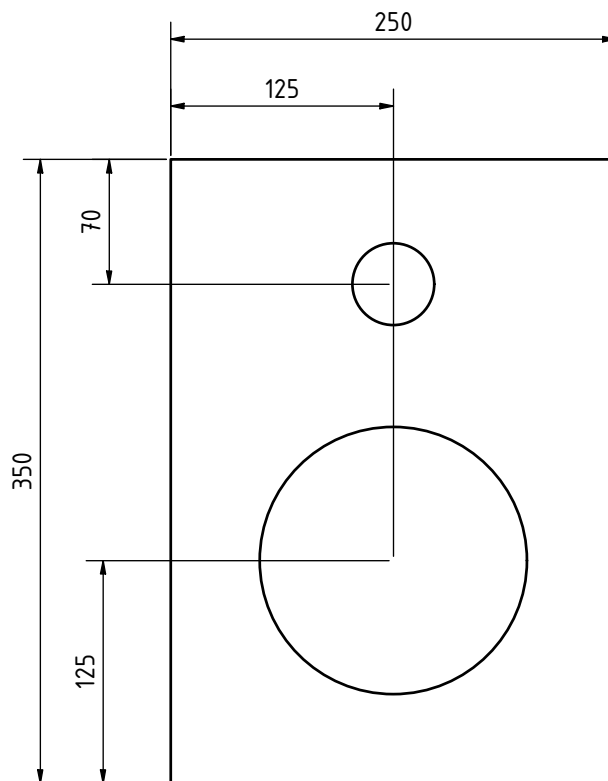
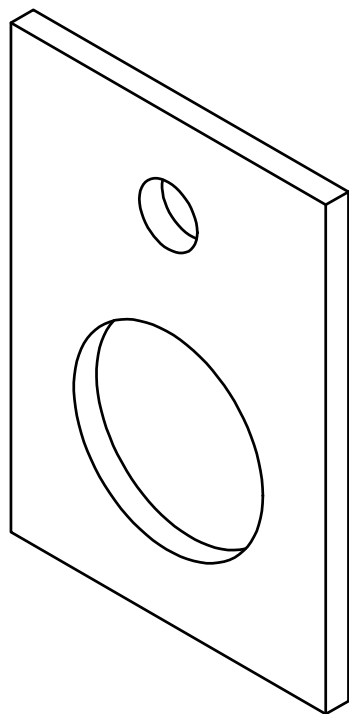


								Obdelníková nesymetrická ozvučnice přední deska				
				Datum	Jméno							
				Nakreslen		Marko Pešek						
				Konfr.								
				Norma								
							Obdelnik_nesym		1			
									A3			
Stav	Změn	Datum	Jméno									

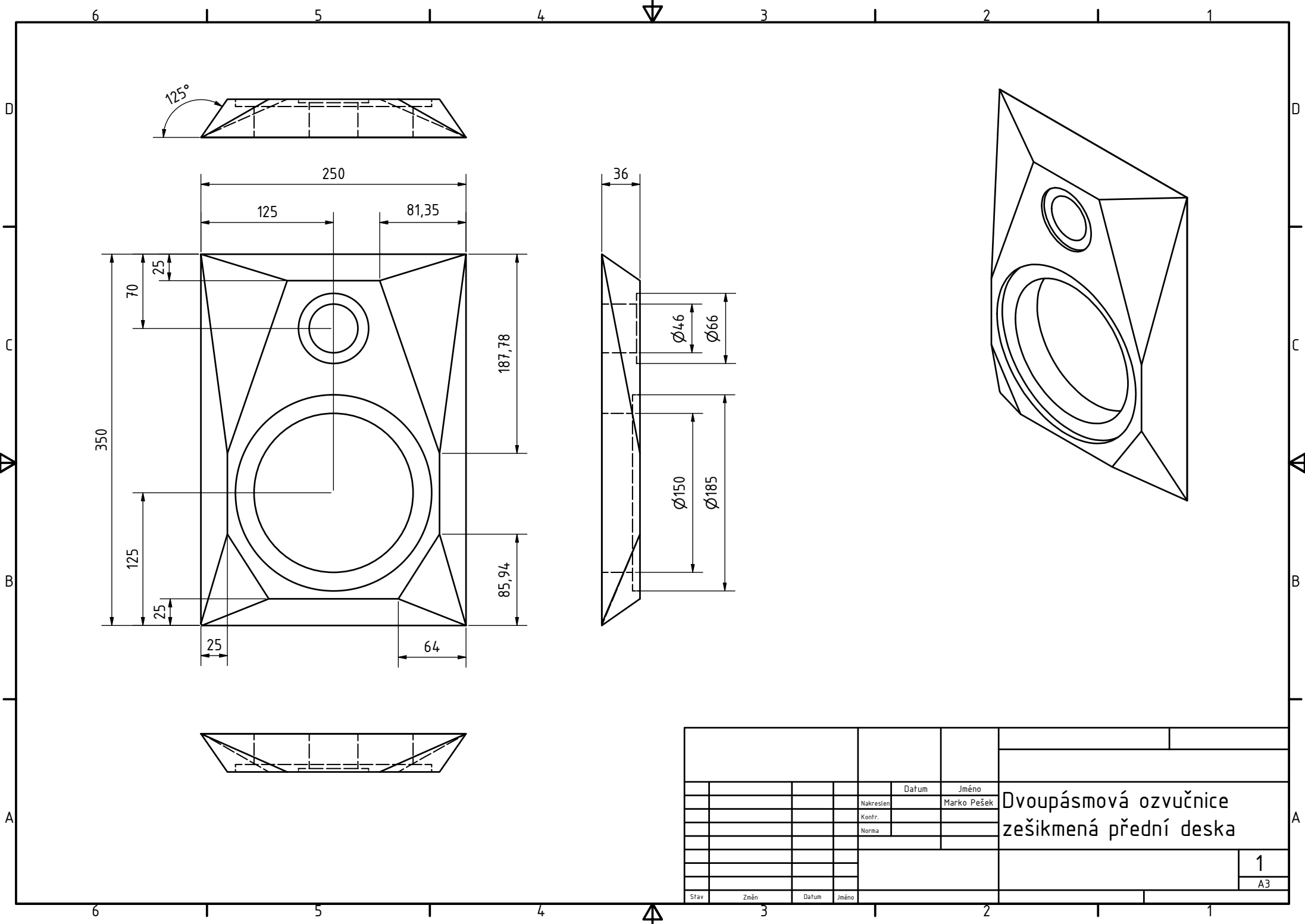




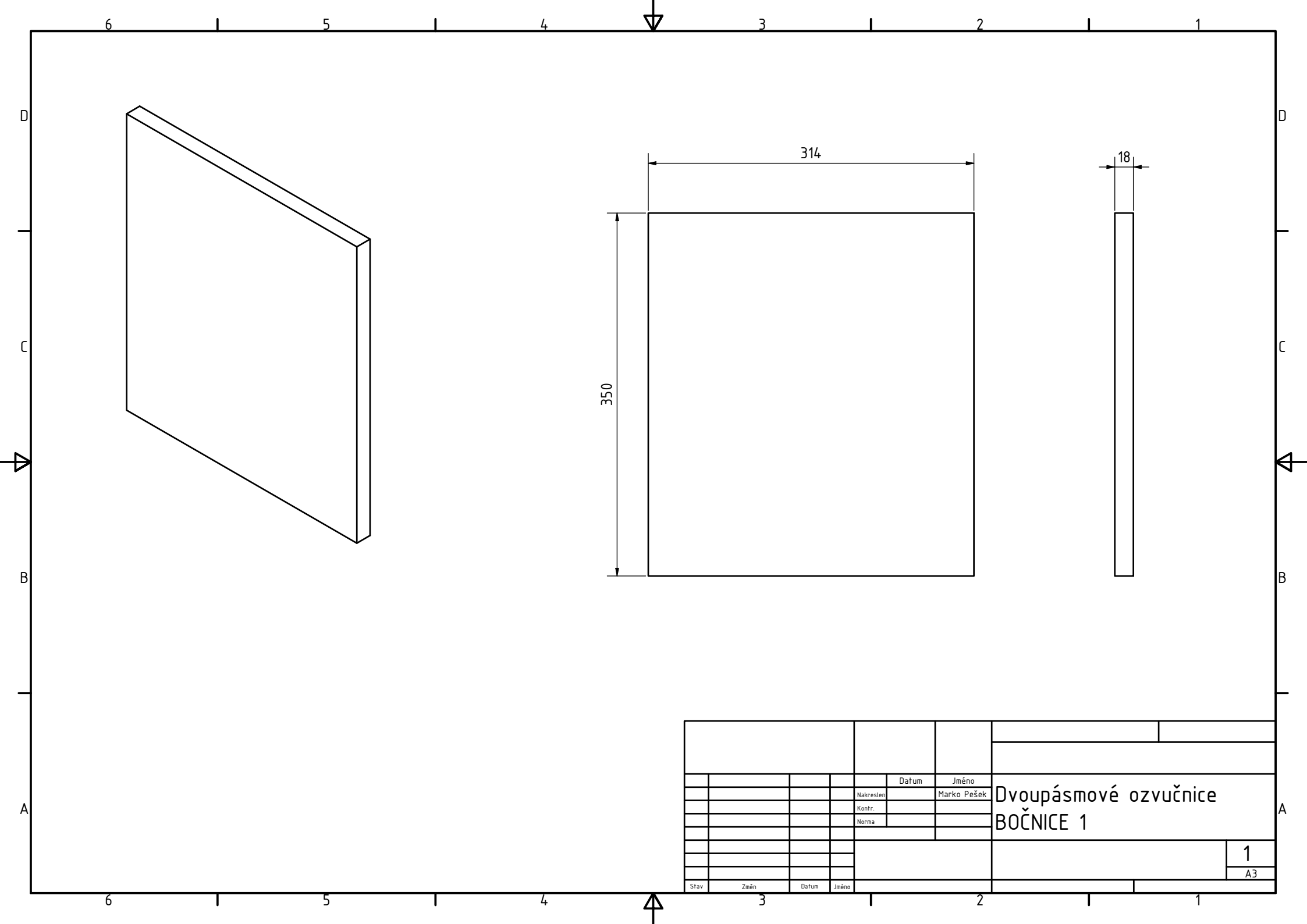


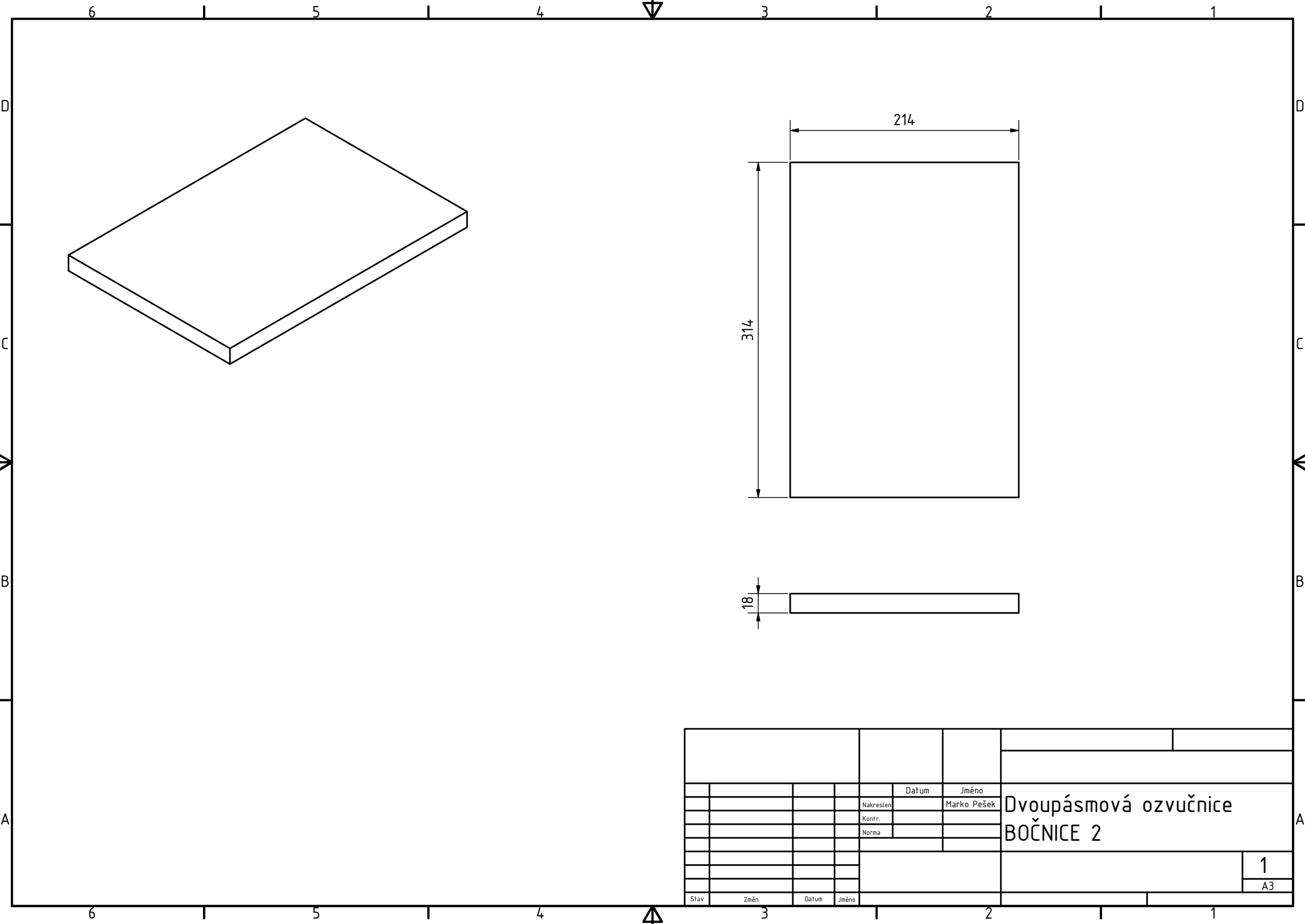


				Datum	Jméno	Dvoupásmová ozvučnice základní přední deska			
			Nakreslen		Marko Pešek				
			Kontr.						
			Norma						
						1 A3			
Stav	Změn	Datum	Jméno						

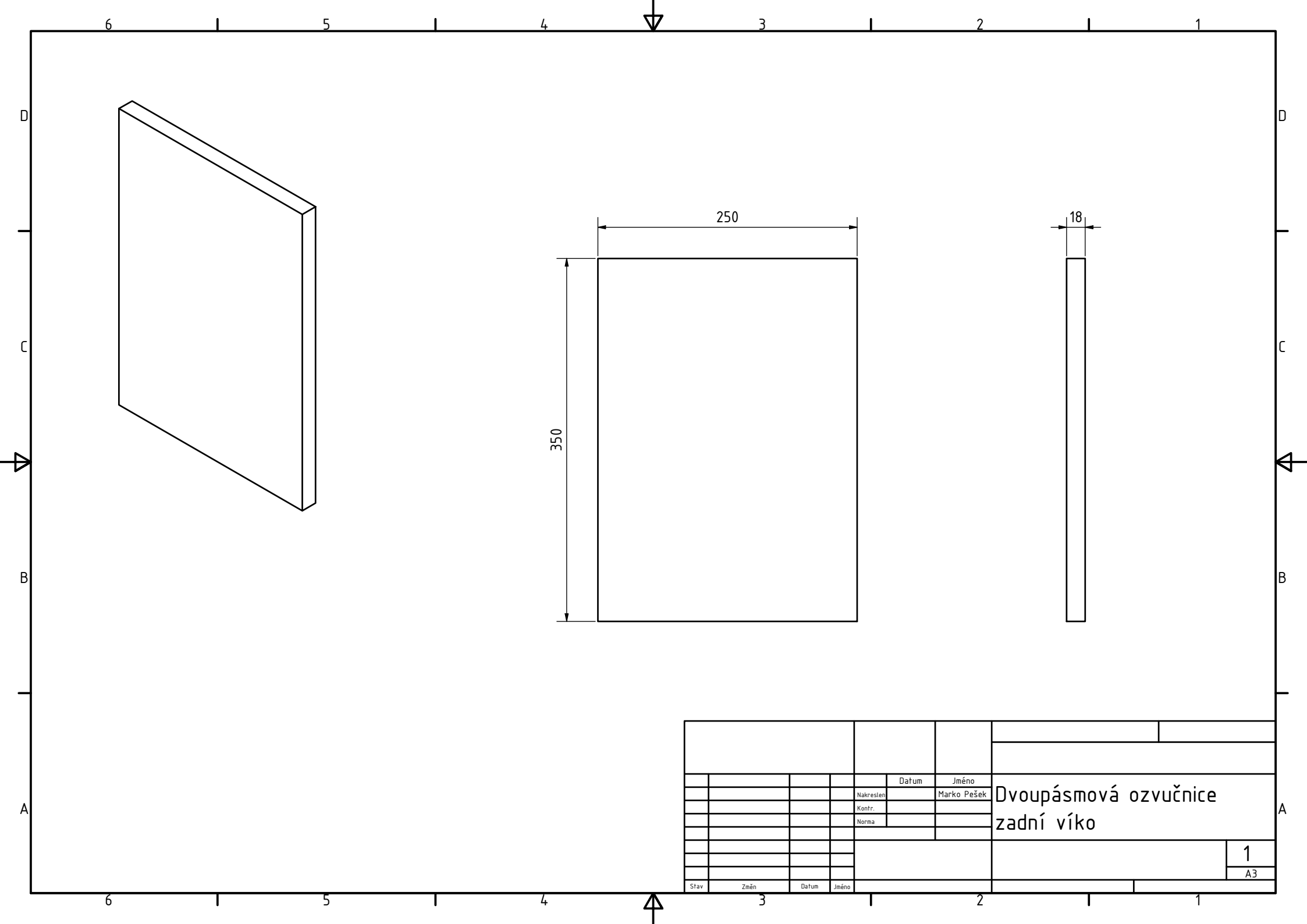


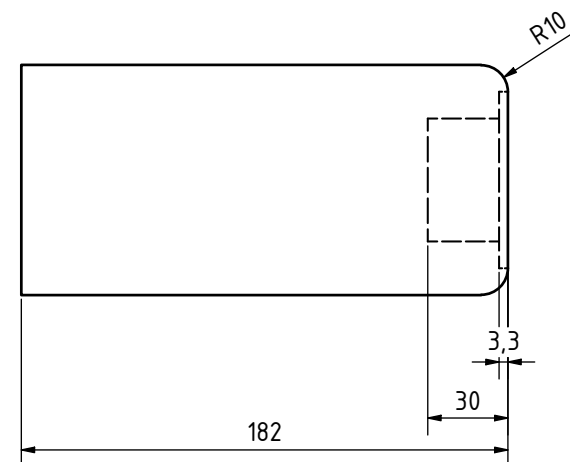
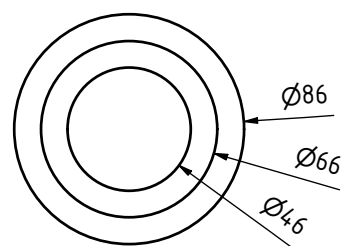
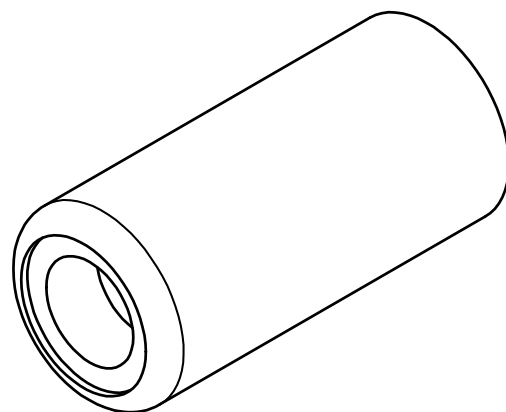
				Datum		Jméno			
				Nakreslen		Marko Pešek		Dvoupásmová ozvučnice zešikmená přední deska	
				Konfr.					
				Norma					



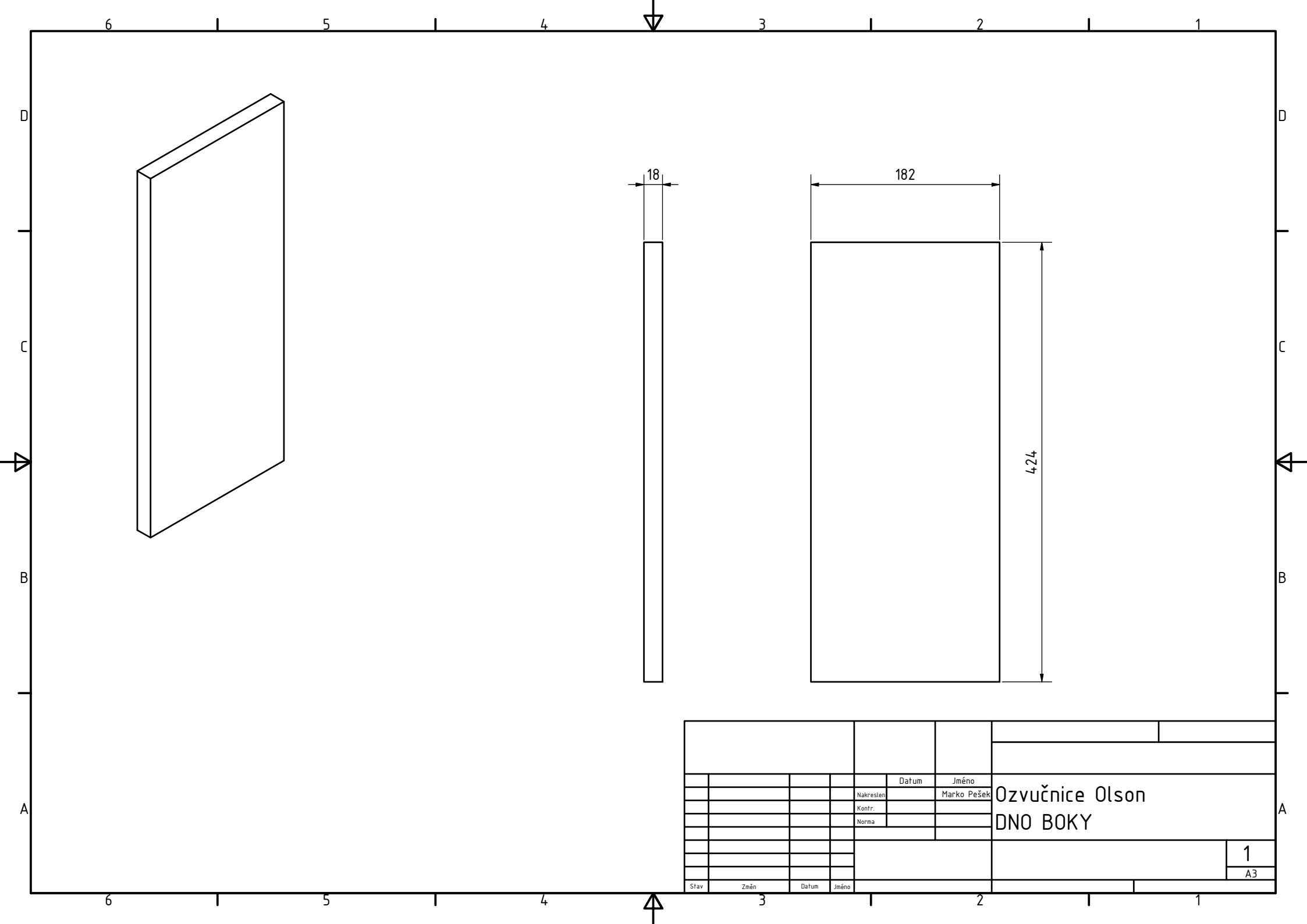


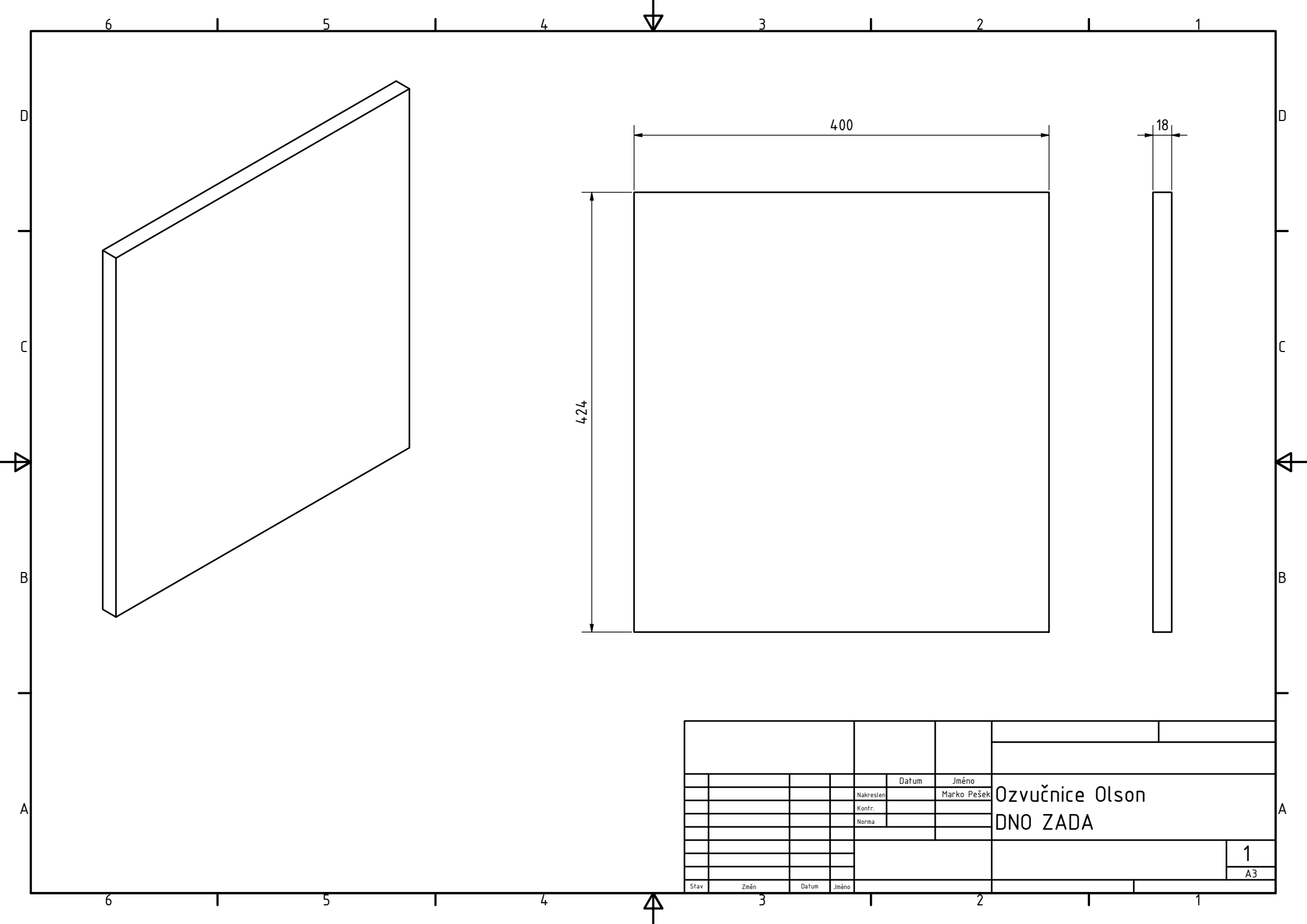
				Datum	Jméno	Dvoupásmová ozvučnice BOČNICE 2		
			Nakreslen		Marko Pešek			
			Kontr.					
			Norma					
Stav	Změn	Datum	Jméno				1	A3



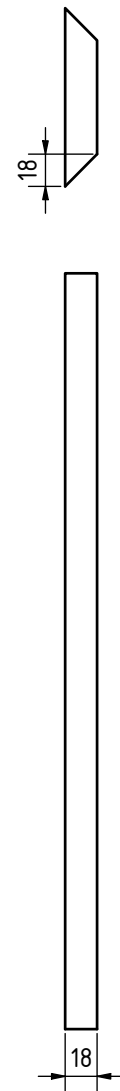
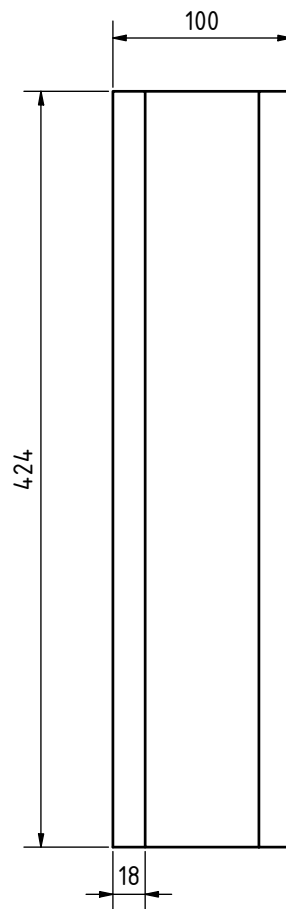
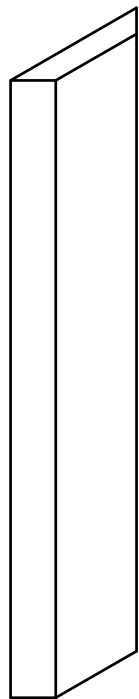


				Datum	Jméno	Dvoupásmová ozvučnice modu výškového reproduktoru	
				Nakreslen	Marko Pešek		
				Konfr.			
				Norma			
						1	
						A3	
Stav	Změn	Datum	Jméno				

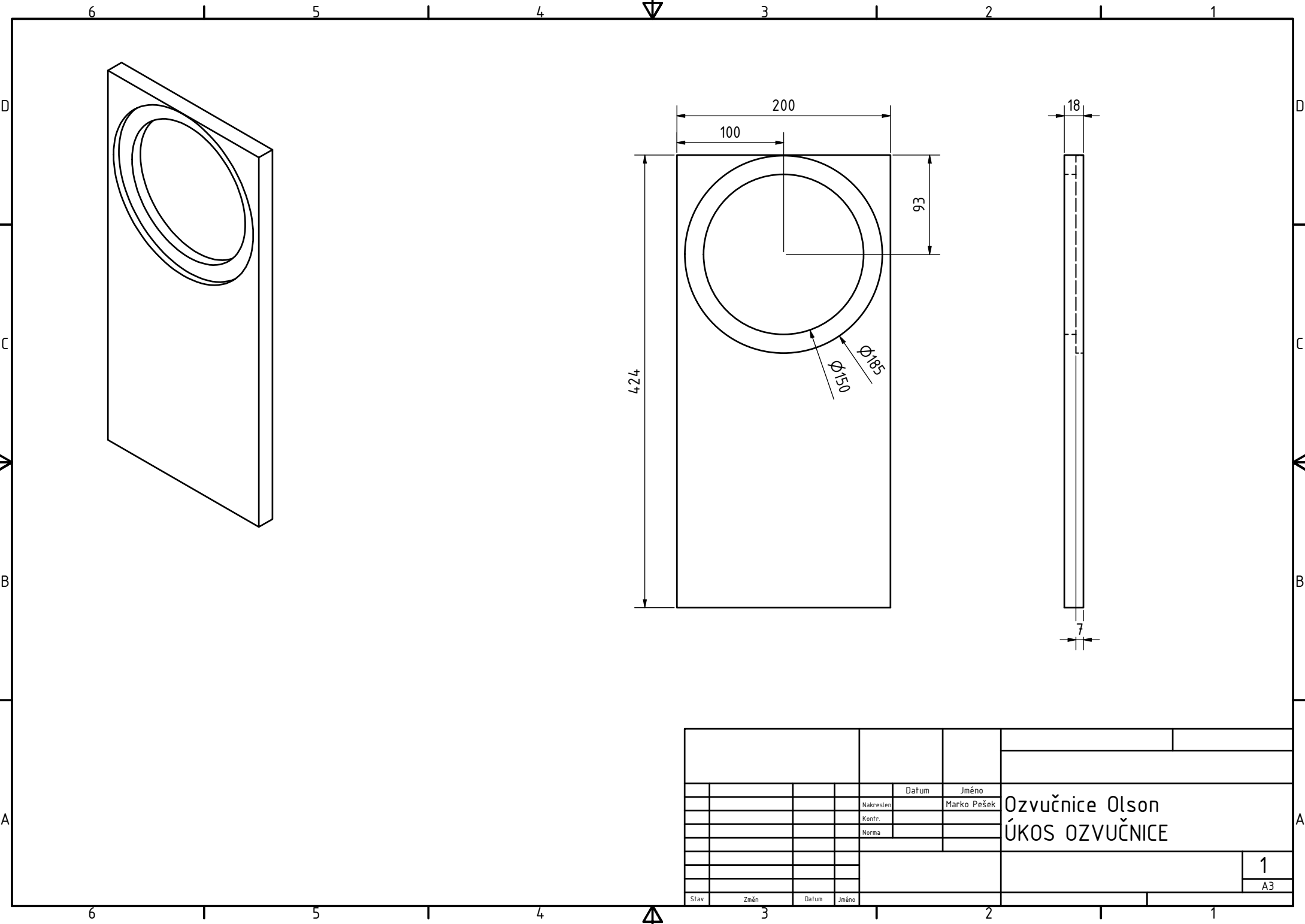




A

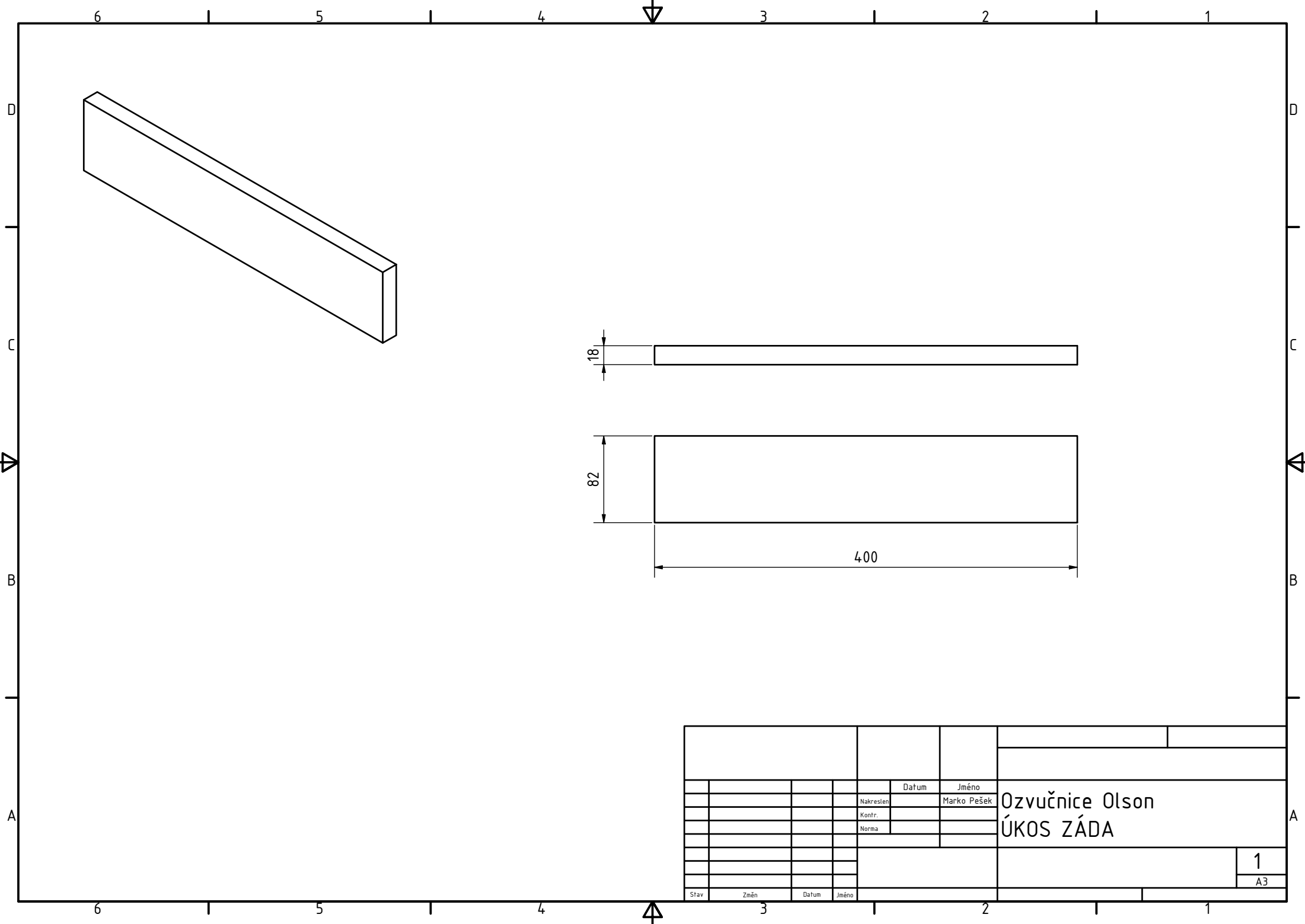


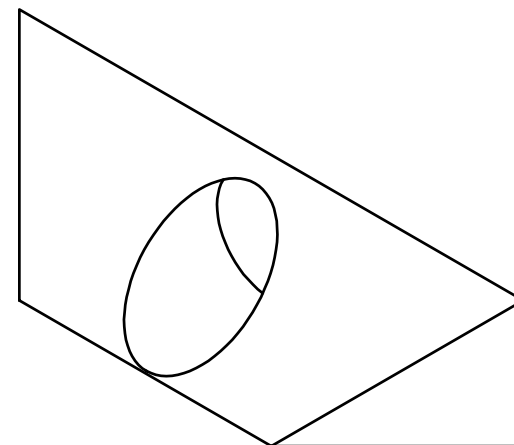
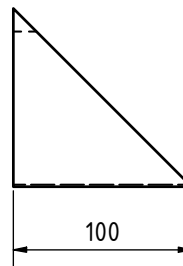
				Datum	Jméno	Ozvučnice Olson ÚKOS BOKY			
			Nakreslen		Marko Pešek				
			Konfr.						
			Norma						
									1
									A3
Stav	Změn	Datum	Jméno						





				Datum	Jméno	Ozvučnice Olson ÚKOS VRCH	
				Nakreslen	Marko Pešek		
				Konstr.			
				Norma			
						1	
						A2	
Stav	Zařin	Datum	Jméno				





				Datum	Jméno	Ozvučnice Olson VRCH ÚKOS	
			Nakreslén		Marko Pešek		
			Kontr.				
			Norma				
						1 A3	
Stav	Změn	Datum	Jméno				

